



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS
PARA PAVIMENTOS COM A UTILIZAÇÃO DE FIBRA ORIUNDA DA
RECICLAGEM DE PNEUS**

Julian Dullius

Lajeado, junho de 2020

Julian Dullius

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS
PARA PAVIMENTOS COM A UTILIZAÇÃO DE FIBRA ORIUNDA DA
RECICLAGEM DE PNEUS**

Projeto de Monografia apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Ma. Débora Pedroso Righi Köhler

Lajeado, junho de 2020

Julian Dullius

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS
PARA PAVIMENTOS COM A UTILIZAÇÃO DE FIBRA ORIUNDA DA
RECICLAGEM DE PNEUS**

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, na linha de formação específica em Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Civil:

Profa. Ma. Débora Pedroso Righi Köhler - Orientadora
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof. Me. Rafael Mascolo
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Profa. Dra. Bruna Kuffner
Universidade Federal de Itajubá - Unifei

Lajeado, 14 de julho de 2020

AGRADECIMENTOS

Meu agradecimento principal vai para a minha família, por me incentivar, dar apoio, suporte, energia e auxílio financeiro durante essa longa caminhada de alguns anos para a conclusão do curso. Minha mãe Silvani, meu pai Algeu e minha irmã Luana, vocês foram de suma importância para eu chegar nesse momento tão especial da minha vida, não só a conclusão de uma graduação, como também de um sonho. Além de vocês, reconhecer também o apoio de outros parentes, como avós, tios(as) e primos(as).

Agradeço aos meus amigos e a alguns colegas de curso, pois em momentos de dificuldade e de desmotivação ao longo desses anos, estavam lá para me incentivar e dar uma motivação extra para que eu não desistisse desse sonho que enfim se conclui.

Agradeço à minha orientadora Débora por toda paciência e auxílio durante esses dois últimos semestres que foram bastante difíceis e desafiadores, mas de muito aprendizado. Sempre foi muito solícita quando procurada por mim. Agradecer também a todos professores do curso de Engenharia Civil por todo conhecimento adquirido ao longo das aulas e dos estudos extras.

E por último, meu agradecimento aos funcionários do LATEC por toda ajuda quando estive com dúvidas para a realização dos ensaios e explicação de normas técnicas para sua execução.

RESUMO

Atualmente, um assunto que vem sendo tratado como de suma importância na construção civil e em outras áreas da ciência e tecnologia é a sustentabilidade. As empresas e os profissionais da área buscam cada vez mais alternativas para controlar o consumo excessivo de matéria prima e também reduzir o elevado volume de resíduos gerados, visando diretamente as questões econômicas e ambientais. Aproveitar os resíduos gerados pelo descarte incorreto de pneus é uma possibilidade para diminuir impactos ambientais e também desenvolver novas técnicas construtivas. Este estudo tem como objetivo analisar as propriedades mecânicas de um concreto específico para pavimentos rígidos, sendo acrescentada fibra de borracha oriunda da banda de rodagem de pneus por meio do processo de recauchutagem. Foram produzidos 4 traços, sendo um deles considerado como o referência sem a adição de fibras, e outros 3 com 0,5%, 1,0% e 1,5% de fibras de borracha adicionadas ao volume total do concreto. Analisou-se as propriedades dos concretos no estado fresco e no estado endurecido por meio dos ensaios de *Slump Test*, de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, de flexão a 4 pontos e de abrasão. O concreto com 0,5% de fibras foi o que obteve os resultados mais satisfatórios, pois apresentou melhor trabalhabilidade e melhorou as resistências aos esforços de compressão, de flexão e de abrasão e também mantendo-se equivalente ao esforço de tração, enquanto os traços com 1,0% e 1,5% de fibras de borracha obtiveram uma elevada perda de resistência mecânica.

Palavras-chave: Concretos. Fibra de borracha. Pavimentos rígidos. Sustentabilidade.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Execução de um pavimento de concreto simples.....	17
Figura 2 - Seção transversal típica de pavimento rígido.....	18
Figura 3 - Número de cidades com corredores de ônibus e BRT's por país.....	24
Figura 4 - Estacionamento de aeronaves em um aeroporto brasileiro.....	25
Figura 5 - Análise econômica comparativa entre os dois sistemas.....	26
Figura 6 - Comparação dos custos totais para um período de 20 anos.....	28
Figura 7 - Diferentes tamanhos de fibras de borracha de pneus.....	32
Figura 8 - Fibras de borracha aumentadas 100 vezes.....	33
Figura 9 - Processo de recauchutagem do pneu.....	35
Figura 10 - Local de armazenamento das fibras.....	35
Figura 11 - Distribuição do mercado brasileiro de fibras de aço entre 2009 e 2010..	37
Figura 12 - Atuação das fibras nas fissuras do concreto.....	38
Figura 13 - Execução de pavimento rígido da Avenida Terceira Perimetral com fibras de polipropileno.....	40
Figura 14 - Diferentes formatos de fibras de aço.....	41
Figura 15 - Concreto com fibras de borracha de pneu.....	44
Figura 16 - Fluxograma do programa experimental.....	46
Figura 17 - Fibras separadas do pó da borracha.....	54
Figura 18 - Ensaio de massa específica das fibras.....	55
Figura 19 - Materiais pesados e separados.....	59

Figura 20 - Moldagem dos corpos de prova.....	60
Figura 21 - Abatimento do concreto referência.....	61
Figura 22 - Ensaio de resistência à compressão.....	63
Figura 23 - Ensaio de tração por compressão diametral.....	64
Figura 24 - Ensaio de flexão a 4 pontos.....	66
Figura 25 - Ensaio de desgaste abrasivo.....	67
Figura 26 - Distribuição das fibras no concreto.....	79
Figura 27 - Ruptura dos CPs sem e com fibras.....	81
Figura 28 - Corpos de prova após o ensaio de abrasão.....	84

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica da areia fina.....	49
Gráfico 2 - Curva granulométrica da areia média.....	50
Gráfico 3 - Curva granulométrica da brita 1.....	53
Gráfico 4 - Curva granulométrica da fibra de borracha.....	57
Gráfico 5 - Resistência à compressão aos 7 dias.....	70
Gráfico 6 - Resistência à compressão aos 21 dias.....	72
Gráfico 7 - Resistência à compressão aos 28 dias.....	73
Gráfico 8 - Ganho de resistência nas idades de ruptura.....	74
Gráfico 9 - Resistência à tração aos 7 dias.....	75
Gráfico 10 - Resistência à tração aos 21 dias.....	76
Gráfico 11 - Resistência à tração aos 28 dias.....	77
Gráfico 12 - Ganho de resistência nas idades de ruptura.....	78
Gráfico 13 - Resistência à flexão aos 28 dias.....	80
Gráfico 14 - Perda de massa por abrasão.....	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais características de concretos de pavimentação.....	19
Quadro 2 - Ensaio de resistência mecânica.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição granulométrica da areia fina.....	49
Tabela 2 - Composição granulométrica da areia média.....	50
Tabela 3 - Composição granulométrica da brita 1.....	52
Tabela 4 - Composição granulométrica da fibra de borracha.....	56
Tabela 5 - Quantidade de materiais para a produção do concreto.....	58
Tabela 6 - Resultados do <i>Slump</i> <i>Test</i>	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute - Instituto Americano de Concreto
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
BRT	Bus Rapid Transit - Trânsito Rápido de Ônibus
CP	Corpo de Prova
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
LATEC	Laboratório da Tecnologia da Construção
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Problema de pesquisa	11
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo geral	12
1.2.2 Objetivos específicos	12
1.3 Justificativa da pesquisa	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Concretos para pavimentos rígidos	15
2.1.1 Classificação	18
2.1.2 Características	19
2.1.3 Materiais	20
2.1.4 Vantagens	22
2.1.5 Exemplos de aplicações	23
2.1.6 Trabalhos relacionados ao tema	26
2.2 Fibras	28
2.2.1 Tipos de fibras (comerciais)	29
2.2.2 Borracha de pneus	31
2.2.2.1 Características	32
2.2.2.2 Processo de produção	34
2.3 Concreto com fibras	36
2.3.1 Polipropileno	38
2.3.2 Aço	40
2.3.3 Borracha de pneus	43
3 MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 Programa experimental	45
3.2 Materiais	46
3.2.1 Cimento	46
3.2.2 Areia	47

3.2.3 Brita	51
3.2.4 Aditivo	53
3.2.5 Água	53
3.2.6 Fibra de borracha de pneu	54
3.3 Dosagem do concreto	57
3.4 Procedimentos para moldagem e cura dos CPs	58
3.5 Slump Test	61
3.6 Ensaios de controle tecnológico	62
3.6.1 Resistência à compressão	62
3.6.2 Resistência à tração por compressão diametral	63
3.6.3 Flexão a 4 pontos	65
3.6.4 Desgaste abrasivo pelo método de abrasão Los Angeles	66
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
4.1 Concreto no estado fresco	68
4.2 Concreto no estado endurecido	69
4.2.1 Resistência à compressão	70
4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral	74
4.2.3 Flexão a 4 pontos	79
4.2.4 Desgaste abrasivo pelo método de abrasão Los Angeles	82
5 CONCLUSÃO	85
REFERÊNCIAS	89
APÊNDICE A - Resultados do ensaio de resistência à compressão	97
APÊNDICE B - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral	98
APÊNDICE C - Resultados do ensaio de flexão a 4 pontos	99
APÊNDICE D - Resultados do ensaio de desgaste abrasivo	100

1 INTRODUÇÃO

Os pavimentos rígidos de concreto armado são amplamente utilizados em países mais desenvolvidos, como em boa parte da Europa, em países asiáticos como Japão e China e também nos Estados Unidos. No Brasil, a aplicação desse tipo de pavimento vem crescendo nos últimos anos, porém, em comparação com a pavimentação asfáltica, esse número é muito inferior. A pavimentação rígida normalmente é aplicada em obras que recebem cargas muito elevadas e que devam suportar essas cargas para que o pavimento exerça suas funções de acordo com o que foi projetado, podendo ser apenas de concreto ou também com o acréscimo de armaduras, para auxiliar nos esforços de tração. Rodovias, aeroportos, estacionamento de aeronaves, corredores de ônibus e BRT's (Transporte Rápido por Ônibus) são os principais tipos de obras em que os pavimentos rígidos são aplicados (FIGUEIREDO, 2011).

A durabilidade é a principal característica e vantagem dos pavimentos de concreto, pois sua vida útil é em torno de duas a três vezes maior do que às de pavimentos flexíveis, podendo chegar até um máximo de 30 anos, da mesma maneira que não necessitam de manutenções periódicas para corrigir certas patologias que venham a ocorrer devido ao tráfego dos veículos e de condições climáticas desfavoráveis. Além da durabilidade, podem ser citadas algumas outras vantagens da aplicação desse tipo de pavimento, como por exemplo, uma maior resistência à abrasão, alta aderência do pneu ao pavimento, distribuição eficaz das tensões, maior resistência a deformações, uma ótima refletividade e também uma alta taxa de segurança (SILVA, 2014).

Com a evolução da tecnologia e de diversas técnicas na construção civil, vem crescendo a utilização de alguns materiais que antigamente eram pouco usados, ou em alguns casos, nem usados eram. Pode-se citar as fibras como sendo um desses materiais que vêm sendo empregados cada vez mais, principalmente adicionadas ao concreto, com o objetivo de melhorar as propriedades do mesmo, auxiliando no seu reforço e aumentando sua resistência mecânica. Existem diversos tipos de fibras, as quais são divididas em quatro classes principais: naturais, minerais, sintéticas ou artificiais e metálicas ou de aço. As mais utilizadas em pavimentos de concreto são as de aço e de polipropileno, devido a suas características específicas que possuem uma boa interação entre a matriz e a fibra.

Neste estudo, foi analisada a aplicação de outro tipo de fibra, a fibra de borracha de pneu, junto a um concreto específico para pavimentos rígidos. Essa fibra é obtida através do processo de recapagem ou de recauchutagem do pneu, podendo ter inúmeros comprimentos e diâmetros, de acordo com o que é solicitado pelo comprador ou com a disponibilidade da empresa que realiza o processo. O aproveitamento dessa borracha por meio da reciclagem, além de contribuir para desenvolver um pavimento mais durável, colabora diretamente com o meio ambiente, visto que não é feito nenhum desperdício desnecessário de um material inorgânico. Alta tenacidade, grande resistência à abrasão e à tração, não ser condutora de energia térmica e elétrica, ser impermeável e possuir resiliência são algumas das características dessas fibras de borracha.

1.1 Problema de pesquisa

O uso de fibras incorporadas ao concreto vem crescendo ao longo dos últimos anos no Brasil e, as fibras de borracha de pneu compactuam com essa realidade. Pesquisas vêm sendo realizadas para analisar quais as vantagens do acréscimo desse material no concreto e também as alterações que elas causam nele. O estudo em questão tratou-se da adição desse tipo de fibra num concreto específico para pavimentos rígidos e, a pergunta a ser respondida é: será que o material estudado

realmente melhora a trabalhabilidade e aumenta a resistência mecânica do concreto para diferentes tipos de esforços?

1.2 Objetivos

Nos itens a seguir, são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa realizada pelo aluno. A pesquisa foi produzida com base em trabalhos de outros autores que assemelham-se ou tenham relação com o tema escolhido pelo acadêmico.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar a influência de diferentes teores de fibra de borracha de pneu adicionadas a um concreto com traço específico para pavimentos rígidos, com a finalidade de analisar seu comportamento mecânico para diferentes tipos de esforços.

1.2.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Analisar as propriedades físicas dos concretos no estado fresco por meio do ensaio de *Slump Test*;
- Avaliar a resistência à abrasão dos concretos com fibras oriundas da reciclagem de pneus;
- Avaliar diferentes quantidades de fibras de borracha de pneu no concreto para determinar qual o melhor percentual de adição ao concreto;
- Realizar ensaios de laboratório para coletar dados quanto à resistência mecânica dos diferentes tipos de concreto analisados.

1.3 Justificativa da pesquisa

De acordo com relatórios elaborados pela PNUMA (2015), o planeta Terra vem sofrendo cada vez mais impactos ambientais negativos, afetando diretamente o meio ambiente e os seres que o habitam, sendo que os principais responsáveis para que isso ocorra, são os próprios seres humanos. Nesse contexto, pode-se citar o desperdício desenfreado de pneus que não podem mais ser utilizados para rodagem dos veículos nas vias, podendo causar, além de impactos ambientais, proliferação de doenças. Pensando nisso, o reaproveitamento dos pneus por meio dos processos de recauchutagem ou recapagem produz um novo tipo de material, as fibras da borracha do próprio pneu, que podem ser aplicadas em diversos casos na construção civil. Neste caso, foi aplicada em um concreto com traço específico para pavimentos rígidos, pois além de contribuir para o meio ambiente, pode vir a prolongar a vida útil do pavimento, diminuindo sua manutenção ao longo dos anos e contribuindo para que ocorram menos problemas para os veículos que transitam por essas vias.

Numa pesquisa realizada por Saad *et al.* (2017), foram utilizados 4 diferentes traços de concreto, sendo um deles convencional e os outros com 5%, 10% e 15% de adição de fibras de borracha de pneus substituindo o agregado. Foram executados ensaios de resistência à compressão axial do concreto aos 7, 14, 21 e 28 dias. Com os resultados obtidos concluiu-se que os melhores resultados à compressão foram com a adição de 5% e 10% das fibras, mesmo sendo abaixo do concreto convencional. Já com 15% de fibras substituídas, o concreto apresentou uma maior flexibilidade, mas sua resistência foi menor que dos demais traços. Também constatou-se que o módulo de elasticidade do concreto diminui com o acréscimo das fibras, obtendo uma melhor condição de deformabilidade.

O trabalho elaborado por Carvalho *et al.* (2018) avaliou a inserção de fibras de borracha de pneus acrescentadas ao concreto levando em conta as porcentagens de 1% a 5% na massa de cimento, além de serem usados dois tamanhos distintos de partículas, com 2,36 mm e 4,75 mm. Foram executados ensaios mecânicos de resistência à compressão, de tração na flexão e de tração por compressão diametral. De acordo com os resultados, verificou-se que as fibras com 4,75 mm obtiveram um melhor desempenho comparado às de 2,36 mm, com resultados

melhores nas porcentagens de 1% e 2% de fibras, os quais geraram ganhos de até 11,8% para tração e 8,66% para compressão. Além disso, foi possível notar que até à porcentagem de 4% de fibras não há queda maior que 10% na resistência mecânica à compressão, ocorrendo apenas na porcentagem de 5% de fibras, onde houve o decréscimo em torno de 19%. Os autores concluíram que a borracha pode ser reaproveitada como fibras em pequenos percentuais para a produção do concreto, pois esse resíduo causa grandes impactos ambientais, e assim, pode ser considerada uma alternativa ecologicamente viável e também contribui para o desenvolvimento tecnológico da construção civil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica do estudo em questão tratou-se basicamente de três temas principais, sendo eles: concretos para pavimentos rígidos, fibras, e por último, a junção dos dois temas, concretos com fibras. Em relação aos concretos para pavimentos rígidos, foi abordada a classificação deles, suas características, os materiais que compõem esses concretos, as vantagens de sua utilização, exemplos de onde podem ser aplicados, e citados alguns trabalhos relacionados diretamente ao tema. A parte das fibras consistiu-se na classificação dos tipos de fibras, dando um enfoque principal para a fibra de resíduo de pneus, especificando suas características e citando como é realizado o processo de produção para sua obtenção. Nos concretos com fibras, foi detalhado os concretos com adição de fibras de polipropileno, fibras de aço e principalmente, com fibras de borracha de pneus. Todos os temas e assuntos abordados na revisão foram retirados através de teses, dissertações, artigos, livros e normas, apresentando as citações dos autores e referenciando-os ao final do trabalho.

2.1 Concretos para pavimentos rígidos

Conforme cita Senço (2007), os concretos para bases rígidas são uma mistura devidamente dosada e uniformizada de agregados graúdos, agregados miúdos, cimento, e água nas dimensões calculadas em projeto. O concreto é a base caracterizada como rígida, e seu dimensionamento segue estudos fundamentados na teoria de Westergaard, sendo capaz de ter ou não barras metálicas em sua

composição. Uma placa de concreto com cimento pode exercer ao mesmo tempo, as funções de base e de revestimento.

O pavimento de concreto tem como características a existência ou não de armaduras em sua constituição. Em cada caso, previamente estudado, é possível definir a escolha mais adequada para a pavimentação. Em conformidade com Silva e Carneiro (2014), destaca-se dentre os diversos tipos de pavimentos de concreto com cimento Portland, esses:

- Pavimento de Concreto Simples: composto por placas de concreto simples separadas por juntas serradas ou juntas moldadas. Pode dispor ou não de dispositivos de transmissão de carga;
- Pavimento de Concreto com Armadura Descontínua: apresenta armadura destinada, unicamente, a combater a fissuração proveniente da retração do concreto. As barras de aço são normalmente colocadas a 5 cm abaixo da superfície e localiza-se em cada junta longitudinal e transversal do pavimento, por esse motivo, é usado o termo descontínua;
- Pavimento de Concreto Continuamente Armado: possui armadura longitudinal contínua e sem a existência de juntas transversais de contração ou expansão. É habitualmente aplicado nas obras de pavimentação de aeroportos;
- Pavimento de Concreto Estruturalmente Armado: contém telas de aço e barras de transferência divididas nas partes superior e inferior da placa. A principal função do aço é de combater as tensões de tração formadas pelo carregamento;
- Pavimento de Concreto Protendido: empregado especialmente em pisos industriais pesados e em pavimentos de aeroportos. Há grande diminuição da espessura do concreto;
- Pavimento de Concreto com Fibras: fibras de aço ou poliméricas são adicionadas às placas de concreto no pavimento. Possui uma maior resistência à fissuração, ao desgaste e ao impacto, além de garantir uma maior ductilidade;
- *Whitetopping*: basicamente é construído um pavimento de concreto apoiado sobre um pavimento asfáltico. É uma solução para reabilitar pavimentos asfálticos já existentes e que contenham patologias.

O pavimento de concreto, atualmente, já é o pavimento mais empregado em estradas de vários países, como: China, Japão, Austrália e Estados Unidos. Esse

pavimento destaca-se por trazer algumas vantagens para seus usuários, como segurança e conforto, e também para a sociedade de uma forma geral, pois os recursos que serão poupados com manutenção, poderão ser empregados para outros fins (MOSCHETTI, 2011).

Em cada obra intrínseca, o engenheiro somente irá descartar a aplicação de um ou outro tipo de concreto com base em limitações de natureza técnica e econômica, em concomitância. Segundo Balbo (2009), não se pode descartar, por suposição, a aplicação de qualquer classe de concreto nas bases e nos revestimentos de pavimentos rígidos. Além disso, atualmente, há uma grande necessidade de reaproveitamento de materiais reciclados, como entulhos de demolições e construções. Sendo assim, o engenheiro deve permanecer com a mente aberta e identificar corretamente o tipo de concreto e os seus componentes passíveis de aplicação em cada tipo de obra. Na Figura 1 observa-se a execução de um pavimento de concreto que não contém armadura em sua composição.

Figura 1 - Execução de um pavimento de concreto simples



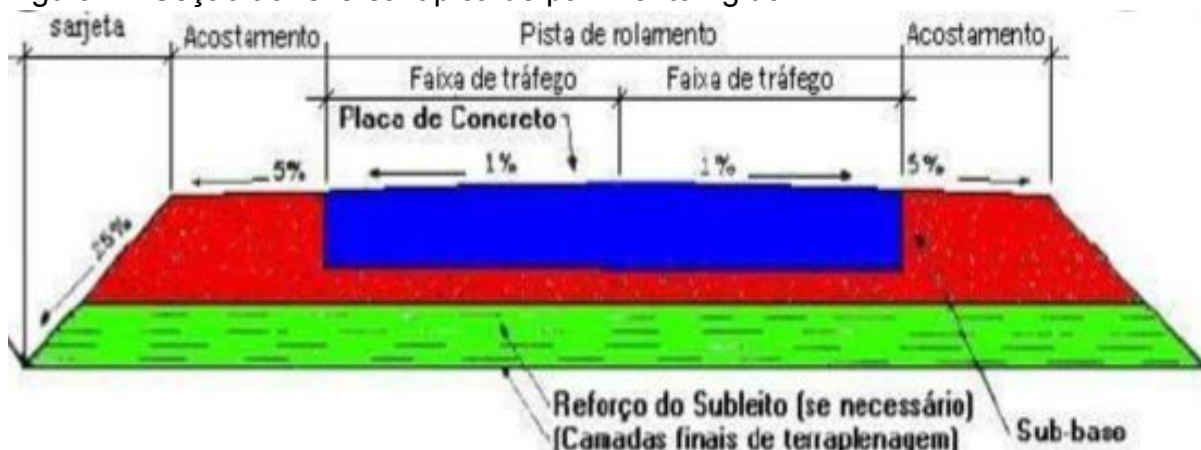
Fonte: Silva (2010).

2.1.1 Classificação

De acordo com a Norma 049-ES (DNIT, 2013), classifica-se pavimento de concreto simples como sendo o pavimento cuja camada é formada por placas de concreto com cimento Portland, sem armadura, que desempenham ao mesmo tempo as funcionalidades de base e revestimento. As placas de concreto têm de ser apoiadas sobre uma sub-base, produzida com espessura e materiais definidos no projeto e não pode ser bombeável, nem apresentar expansibilidade, garantindo um suporte uniforme às placas ao longo do tempo.

Para Marques (2006), os pavimentos rígidos são compostos por camadas que trabalham basicamente à tração. O seu dimensionamento é fundamentado nas características resistentes de placas de concreto com cimento Portland, que são assentadas em uma camada de transição, mais conhecida como sub-base. A definição da espessura é obtida a partir da resistência à tração do concreto e algumas considerações são feitas em relação à fadiga, cargas aplicadas e coeficiente de reação do subleito. Os pavimentos rígidos também são pouco deformáveis quando possuem uma vida útil maior. O dimensionamento dos pavimentos flexíveis é influenciado pela resistência do subleito e o dos pavimentos rígidos pela resistência do próprio pavimento. Na Figura 2 pode-se verificar a seção característica de um pavimento rígido.

Figura 2 - Seção transversal típica de pavimento rígido



Fonte: Marques (2006).

2.1.2 Características

Balbo (2009) cita algumas características associadas a concretos de pavimentação que demandam um controle tecnológico rigoroso, onde o pavimento não deve operar com falhas funcionais ou estruturais, em que algumas se manifestam precocemente. No Quadro 1 é possível analisar essas características, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido, apresentando os motivos de controle dessas características e as possíveis consequências patológicas que podem vir a ocorrer se não houver um controle adequado.

Quadro 1 - Principais características de concretos de pavimentação

Estado do concreto	Características	Motivo de controle	Consequências possíveis
Fresco	Trabalhabilidade	Compatibilidade com o processo construtivo	Inúmeras imperfeições estruturais e geométricas
Fresco	Segregação/exsudação	Qualidade superficial	Lamelação, textura inadequada
Fresco	Retração plástica	Evitar fissuras de superfície	Degradação estrutural
Endurecido	Retração de secagem	Evitar fissuras de contração não programadas	Ruptura precoce
Endurecido	Resistência estática	Adequação ao projeto estrutural	Ruptura precoce
Endurecido	Módulo de elasticidade	Adequação ao projeto estrutural	Estados de tensão não previstos
Endurecido	Resistência à fadiga	Adequação ao projeto estrutural	Ruptura precoce
Endurecido	Porosidade/permeabilidade	Percolação de água	Empenamento higrométrico, reação álcali-agregados, corrosão de armaduras
Endurecido	Expansão térmica	Efeitos relacionados a cargas ambientais	Empenamento não controlado
Endurecido	Abrasividade	Qualidade superficial	Perda de qualidade funcional

Fonte: adaptado de Balbo (2009).

Ainda segundo Balbo (2009), não se pode controlar todas as características nas mais diversas obras, muitas vezes em virtude da tecnologia disponível para o controle tecnológico, da falta de especificação adequada e de custos e prazos que não são compatíveis com os parâmetros da obra. Exemplificando, os ensaios de fadiga apontam alguns inconvenientes: exigem tratamento estatístico singular, técnicos e equipamentos especializados, além de serem lentos. Por consequência, recomendam-se para obras de grande responsabilidade, tais como, amplos corredores urbanos de ônibus e para autoestradas. Outra circunstância muito incômoda para a tecnologia da pavimentação é a escassez de diretrizes técnicas para controle e execução de juntas serradas que contém barras de transferência de carga, podendo afetar qualquer tipo de obra de pavimentação rígida.

Define-se durabilidade do concreto como sendo a capacidade deste material de conservar suas características físicas e também seu desempenho no decorrer da sua vida útil, frente a situações de exposição. É também competência do concreto resistir aos ataques destrutivos de substâncias químicas, à ação do meio ambiente, à abrasão ou a qualquer outro tipo de deterioração, conservando no decorrer do tempo seu formato original, seu comportamento em serviço e a sua qualidade. Sendo assim, a durabilidade do concreto vai depender, tanto das suas características particulares quanto do meio ambiente em que está submetido (LORENZETTI, 2002).

2.1.3 Materiais

Os principais materiais utilizados em pavimentos de concreto com cimento Portland, segundo o DNIT (2005, p. 17), são: o próprio cimento Portland, os agregados graúdos e os miúdos, aditivos, água e também materiais específicos para selar as juntas.

Para os agregados indicados à fabricação de concreto de cimento Portland designado para obras de pavimentação rígida, são impostas condições especiais que divergem daquelas aplicadas para concreto de pontes, de edificações e de outros tipos de estruturas em geral. Isto ocorre, ainda de acordo com o DNIT (2005, p. 17), pelo fato de que o concreto de pavimentação tem de ter obrigatoriamente

uma maior resistência à tração, menor suscetibilidade de fissurar, menores variações volumétricas, resistência à fadiga e uma durabilidade superior à ação do meio ambiente e também à ação abrasiva de tráfego no local, comparado com os exemplos citados anteriormente.

Conforme o DNIT (2005, p. 26), o cimento Portland tem em sua composição clínquer e adições, como a escória de alto forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos, que misturam-se ao clínquer na fase de moagem, variando nos tipos de cimento, sendo que essas adições e suas características são os principais fatores para se definir os diversos tipos de cimento. De acordo com o teor e o tipo de adições, são normatizados pela ABNT esses tipos de cimento:

- a) Cimento Portland comum - CPI
 - Sem adição: CPI
 - Com adição de materiais carbonáticos: CPI-S
- b) Cimento Portland composto - CP II
 - Com adição de escória: CP II-E
 - Com adição de materiais pozolânicos: CP II-Z
 - Com adição de materiais carbonáticos: CP II-F
- c) Cimento Portland de alto forno - CP III
- d) Cimento Portland pozolânico - CP IV
- e) Cimento Portland de alta resistência inicial (ARI) - CP V
- f) Outros tipos:
 - Cimento Portland branco estrutural: CP B
 - Cimento Portland de baixo calor de hidratação
 - Cimento Portland resistente aos sulfatos

A água indicada ao amassamento e à cura não pode conter substâncias que prejudiquem o processo de pega e de endurecimento do concreto, considerando como satisfatório as águas que são tratadas e usadas no abastecimento das populações nos municípios. Todavia, a ideia que parte do argumento de que “se a água for boa para o consumo humano, também será boa para se usar na produção do concreto” nem sempre retrata a verdade. Um exemplo claro disso é a presença de uma pequena porção de açúcar na água, não impedindo-a de ser consumida pelo homem, porém, tornando-a insatisfatória para ser utilizada como água de

amassamento. Conforme o DNIT (2005, p. 31), em caso de incertezas ou se a água utilizada no concreto não for tratada, ou seja, quando for derivada de reservatórios naturais, poços, córregos ou rios, ensaios de caracterização tecnológica deverão ser realizados com obrigatoriedade em amostras desta água. Outro fator importante que deve ser levado em consideração para a escolha da água de amassamento é o valor do pH desta água.

Os aditivos podem ser estabelecidos como toda substância a qual não pode ser indispensável à composição ou à utilidade do concreto em si, porém, quando acrescentada a ele em pequenas quantias, antes ou após a mistura, acaba por gerar ou reforçar certas propriedades do concreto, tanto no estado plástico, quanto no seu estado endurecido. Segundo o DNIT (2005, p. 39), os aditivos são incorporados ao concreto para: diminuir ou retardar o calor de hidratação, reduzir a permeabilidade, melhorar a trabalhabilidade, torná-lo mais resistente aos seus agentes agressivos, acelerar ou retardar o tempo de pega, acelerar o progresso da resistência nas suas idades iniciais e desenvolver propriedades inseticidas, germicidas e fungicidas.

2.1.4 Vantagens

Os pavimentos são as camadas fundamentais no processo de conservação das rodovias. Eles contêm estruturas variadas com diferentes espessuras, as quais têm finalidades técnicas e econômicas, além de resistir aos esforços oriundos do clima e especialmente do tráfego de veículos, proporcionando conforto aos usuários da via, melhoria das condições de rolamento, segurança e economia (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Em toda a malha rodoviária brasileira, a aplicabilidade do pavimento de concreto ainda é muito baixa comparando-se com o pavimento flexível, que é o mais comum nas rodovias brasileiras, porém, sua utilização está crescendo consideravelmente, vindo a proporcionar à população os benefícios do seu uso (ANANIAS *et al.*, 2011).

Como o concreto é uma substância muito dinâmica na construção civil, então pela lógica, será importante também na pavimentação de rodovias por causa das suas características de aplicabilidade e de durabilidade. De acordo com Freitas e

Carvalho (2018), a utilização do concreto na pavimentação é fácil e as rodovias não necessitam ficar muito tempo paradas, atrasando os processos automotivos e nem produtivos, pois sua aplicação é rápida, desde que sejam cumpridas as recomendações de aplicação, assim sendo, os resultados poderão ser considerados como satisfatórios.

Conforme cita Araújo *et al.* (2016), as vantagens da pavimentação de concreto são: a grande resistência a deformações, alta aderência do pneu, maior resistência à abrasão, uma ótima refletividade, tornando-o ideal para condução noturna, distribuição eficaz das tensões, uma alta taxa de segurança, diminuindo os riscos de aquaplanagem pelo fato de possuir uma melhor aderência e, talvez a mais importante delas, uma vida útil muito maior que a de pavimentos asfálticos, aproximadamente 30 anos, mais do que o dobro da citada anteriormente. O pavimento rígido de concreto também passará por menos operações de manutenção ao longo da sua vida útil.

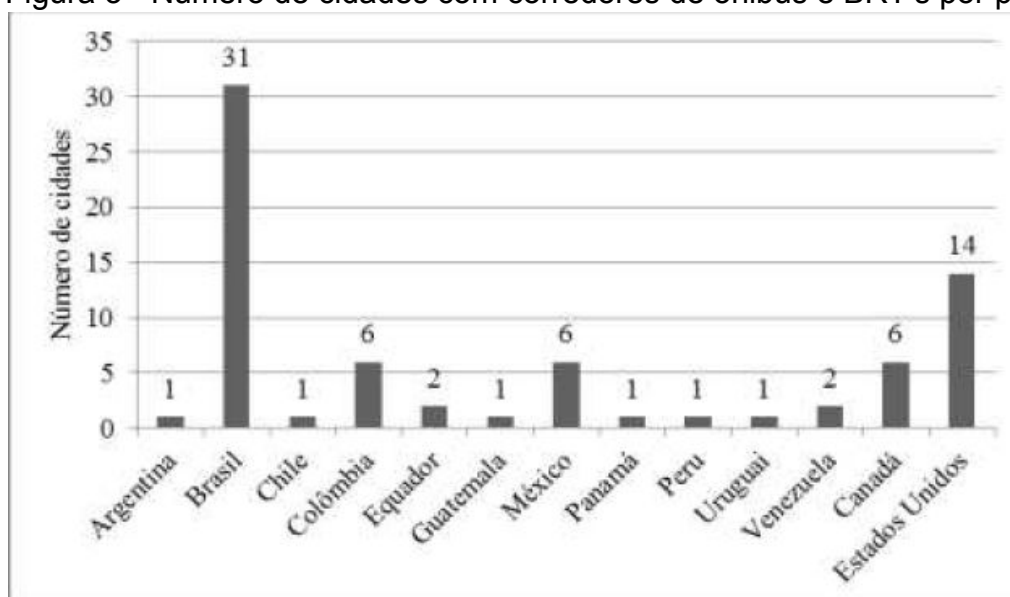
Recomenda-se o pavimento rígido em concreto para corredores de ônibus (BRT) e para vias que tenham um tráfego pesado de veículos. A sua construção aponta um custo maior se comparado ao asfalto. O valor não é exato devido à grande diversidade dos tipos de concreto asfáltico e também dos valores dos insumos em cada região. Entretanto, o pavimento de concreto têm custo em média 30% superior em comparação com o pavimento asfáltico. Apesar do custo ser maior, o pavimento rígido resistirá por muito mais tempo, praticamente sem necessitar de manutenção (FREITAS *et al.*, 2018).

2.1.5 Exemplos de aplicações

A relação entre custo e benefício é primordial na questão da pavimentação das rodovias. Segundo Ananias *et al.* (2011), o pavimento de concreto é empregado com sucesso em rodovias, aeroportos, portos e corredores de ônibus, pois além de ter maior resistência e a sua vida útil ser muito superior em relação a outros pavimentos, o sistema assegura maior qualidade e economia de combustível, além de não sofrer buracos e deformações plásticas.

De acordo com Almeida (2015), o pavimento rígido é propício para vias que possuem como características um tráfego pesado, intenso e repetitivo, caso de corredores de ônibus. Com base nos dados da Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, no município de São Paulo-SP existem mais de 190 quilômetros de corredores de ônibus que foram projetados e construídos em pavimento de concreto, sendo esse o maior valor, levando em consideração os mais de 5.500 municípios brasileiros. Já na cidade de Curitiba, capital do estado do Paraná, que é reconhecida mundialmente por possuir um transporte urbano coletivo muito eficiente, com sistema integrado e BRT's, este valor ultrapassa a casa dos 90 quilômetros. A Figura 3 mostra que o Brasil é o país com maior número de cidades com BRT's em todo mundo.

Figura 3 - Número de cidades com corredores de ônibus e BRT's por país



Fonte: Almeida (2015).

Esses dados, apesar de serem significativos, não correspondem à preferência deste modelo de pavimento no Brasil em comparação com outros países. Conforme cita Mesquita (2001), os pavimentos de concreto vem sendo amplamente empregados nas estradas de primeira categoria e nas vias urbanas com alto tráfego, em diversos países, como Alemanha, Inglaterra, Itália e Japão, onde aproximadamente 50% das suas estradas são de concreto. Ao mesmo tempo que no Brasil, as

estradas de concreto não correspondem nem à 5% do total, segundo relatório da ANTT (2014).

Os pavimentos de concreto apontam vantagens em aeroportos devido essencialmente a ter uma grande durabilidade, e são encontrados em áreas de estacionamento das aeronaves de praticamente quase todos os aeroportos de grande porte do Brasil. A maior parte desses pavimentos é composta por estruturas de concreto simples, as quais expõem algumas limitações, com relação ao controle da fissuração e também do tamanho das placas. Rodrigues (2004) cita que na atualidade têm-se visto experiências de sucesso em estruturas de concreto protendido, como por exemplo, as pistas do aeroporto do Rio de Janeiro e as áreas de estacionamento dos aeroportos de Porto Alegre e Curitiba, caracterizadas pelo elevado espaçamento entre as juntas e pela baixa espessura da placa. Todavia, há outro tipo de pavimento que também é bastante apropriado para aeroportos, o estruturalmente armado, o qual foi empregado com enorme sucesso no aeroporto de Estocolmo, capital da Suécia, funcionando com ótimo desempenho por mais de 30 anos. A Figura 4 mostra o estacionamento de aeronaves em um aeroporto no Brasil.

Figura 4 - Estacionamento de aeronaves em um aeroporto brasileiro



Fonte: Rodrigues (2004).

Segundo Mesquita (2001), no Brasil não houve um desenvolvimento contínuo dos pavimentos de concreto, tendo ocorrido uma pausa no período entre 1960-1990 e um aumento no início dos anos 90, com mínimo progresso na utilização destes pavimentos. Houve um novo crescimento considerável nos últimos anos, motivado, dentre outros fatores, pela alta no preço do petróleo. O mesmo autor em sua

pesquisa fez um estudo de caso para a rodovia federal BR-262, situada no município de Miranda-MS, comparando os dois sistemas construtivos de pavimentação (flexível e rígido) para analisar qual deles seria mais viável para a implantação no local especificado. Conforme pode ser analisado na Figura 5, o pavimento rígido seria uma alternativa muito mais econômica para ser executado neste local.

Figura 5 - Análise econômica comparativa entre os dois sistemas

Análise Econômica Comparativa – Resumo (20 anos)					
Alternativa	Reduções nos Custos (R\$/Km)		POUPANÇA LÍQUIDA		
	Construção	Conservação/Operação	em 1 Km	em 97,389 Km	TIR
	CUSTO	BENEFÍCIO	Valor(R\$)	Total(R\$)	
CCP/WT(*)	-142.319,70	729.632,91	587.313,21	57.197.846,21	38,35%
CCP/WT(**)	-142.319,70	376.543,94	234.224,24	22.810.864,51	
CCA/CBUQ(*)	142.319,70	-729.632,91	-587.313,21		

(*) Base Valor Corrente

(**) Base Valor Presente

Fonte: Mesquita (2001).

2.1.6 Trabalhos relacionados ao tema

O objetivo de Silva (2010) foi analisar, por meio de um estudo experimental em laboratório, a interferência de juntas de pavimentos de concreto em relação à eficácia do intertravamento das barras de transferência e dos agregados, a influência que a posição das barras de transferência exerce na junta e a ligação entre a utilização do concreto simples convencional (adensado por vibração mecânica), concreto simples autoadensável e também do concreto simples convencional, adicionadas fibras metálicas.

A dissertação elaborada por Oliveira (2000) teve como objetivos principais: analisar o desempenho estrutural de placas de concreto e de juntas de pavimentos rodoviários, de pisos industriais e de vias urbanas, apresentando métodos do dimensionamento de pavimentos com concreto simples e com concreto armado, incorporando os conceitos ditados pela norma brasileira de concreto, procurando

diferenciar os vários tipos de pavimentos rígidos. Estudou-se os fatores principais que influenciam no dimensionamento, como os modelos de cálculo, as ações e o comportamento perante o carregamento cíclico.

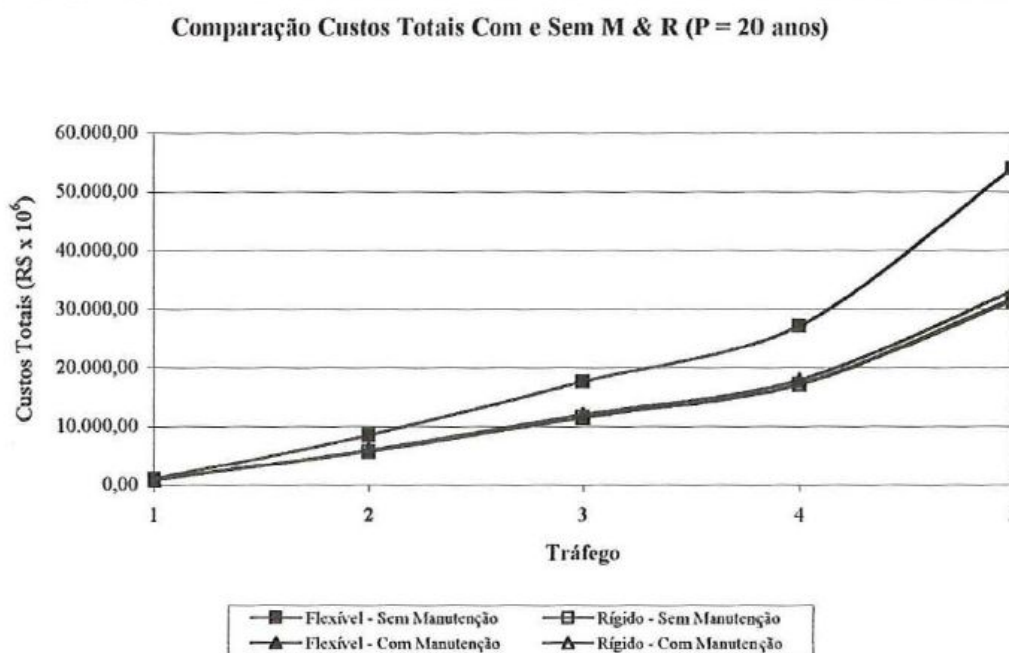
Oliveira (2000) concluiu que por estarem disponíveis diferentes tecnologias para a execução de pavimentos, na produção de um projeto, têm de ser avaliadas as várias opções, do ponto de vista econômico, de durabilidade e de qualidade. A vantagem mais importante apresentada por um pavimento de concreto é a durabilidade, mesmo quando for submetido a um intenso tráfego de veículos. Pôde-se analisar que a quantidade de solicitações tem uma enorme importância para se dimensionar um pavimento rígido. Consequentemente, a projeção de tráfego com o trabalho de contagem é essencial para se executar um bom projeto.

A dissertação apresentada por Biroli (2003) teve como objetivo estudar todas parcelas de custos envolvendo pavimentos rígidos e flexíveis no decorrer da sua vida útil, tratando dos custos de construção, de reabilitação e manutenção, além dos custos de operação dos veículos. A comparação dos custos entre os dois tipos de pavimentos é proveniente da investigação dos custos totais adquiridos para todas as combinações dos fatores intervenientes. Os fatores a serem utilizados são: materiais e espessuras das camadas (dimensionamento), estratégia de manutenção, tipo de subleito, reabilitação dos pavimentos e as solicitações e volumes de tráfego.

Os resultados obtidos pelo estudo de Biroli (2003) revelam que o custo de construção dos pavimentos rígidos é maior que o dos pavimentos flexíveis, utilizando com base a Tabela de Preços Unitários do DER-SP, empregada para se comparar os custos de construção. A diferença entre pavimentos rígidos e flexíveis ficou na faixa de 40 a 60%. Porém, pelo programa HDM-4, os resultados apresentam que os custos da operação de veículos nos pavimentos flexíveis são até 8% maiores que os custos de operação dos veículos nos pavimentos rígidos. A importância referente a esse tipo de custo aumenta consideravelmente com o aumento do volume de tráfego, ultrapassando até 95% dos custos totais. Dada a relevância dos custos de operação dos veículos, acabam condicionando a análise comparativa dos custos totais. Deste modo, com exceção para menores volumes de tráfego e períodos mais curtos de projeto, considerando como análise o programa HDM-4, os custos totais de pavimentos flexíveis foram maiores aos custos totais de

pavimentos rígidos, em até 8%. Na Figura 6 fica mais visível a visualização desses dados.

Figura 6 - Comparação dos custos totais para um período de 20 anos



Fonte: Biroli (2003).

2.2 Fibras

A resistência mecânica e o módulo de elasticidade são as duas propriedades consideradas como mais importantes na definição da capacidade do reforço que a fibra pode vir a proporcionar ao concreto. Pasa (2007) classifica as fibras como, fibras de baixo e fibras de alto módulo.

Fibras com pouca resistência e baixo módulo de elasticidade somente são eficientes quando a resistência e o módulo de elasticidade do concreto também forem baixos, ou seja, no seu estado fresco e no começo do processo de endurecimento. Desta forma, as fibras de náilon e polipropileno são usadas para o controle da fissuração plástica, por exemplo, nos pavimentos. Vale destacar que as fibras citadas anteriormente não suprimem a necessidade de se realizar uma boa cura do concreto, mas elas atuam para minimizar o risco da fissuração plástica. Já as fibras de aço, que dispõem de uma alta resistência e um alto módulo de elasticidade, agem como um reforço para o concreto endurecido, conseguindo até mesmo substituir a armadura convencional em algumas ocasiões (ISAIA, 2005).

Ainda de acordo com Isaia (2005), um dos benefícios do reforço propiciado pelas fibras é o fato delas se espalharem aleatoriamente no material, fortalecendo toda peça, e não somente uma determinada posição, como normalmente ocorre com armaduras convencionais. Em contrapartida, se a peça estrutural tiver esforços bem localizados, como acontece numa viga bi-apoiada, em que as tensões de tração se retêm na sua parte inferior, a utilização das fibras será inviável, pois elas não conseguirão substituir as barras de aço de forma econômica. Isto acontece porque nas barras de aço tem-se a opção de posicioná-las de maneira precisa, otimizando o reforço da estrutura.

2.2.1 Tipos de fibras (comerciais)

Segundo Quinino (2015), as fibras podem ser classificadas, de acordo com sua origem, em três grupos principais:

- Fibras naturais: este grupo engloba as fibras que possuem uma tendência natural em sua formação, sendo facilmente encontradas em meio à natureza. Pode-se citar, por exemplo, piaçava, coco, palha de arroz, bagaço de cana-de-açúcar, seda, fibras naturais de sisal, fibras animais tipo lã, fibras minerais de asbestos e crinas de cavalo;
- Fibras sintéticas ou artificiais: como seu próprio nome indica, estas fibras são produzidas pelo homem, através da utilização de tecnologias e de diversos materiais. Esta classe de fibra deriva-se normalmente de polímeros orgânicos como celulose, bem como de resinas de borracha, polipropileno, nylon, PVA, PVC, acrílico, poliéster, petróleo, aramida, dentre outras;
- Fibras metálicas ou de aço: são fabricadas a partir dos fios de aço trefilados, com vários comprimentos e diâmetros, podendo ser produzidas com ligas metálicas e aço-carbono.

Além dos três grupos citados, conforme menciona Festugato (2008), existe ainda o grupo das fibras minerais, as quais englobam as fibras de vidro, de carbono e também as de amianto.

As fibras de polipropileno constituem-se de um material polimérico denominado termoplástico. Os polímeros termoplásticos compõem uma série de

grandes cadeias de moléculas polimerizadas. Essas cadeias separam-se e podem deslizar-se entre si. Esta propriedade explica a grande tenacidade e flexibilidade das fibras de polipropileno e permite um aumento substancial da sua resistência ao impacto aos materiais em que foi incorporada. O seu módulo de elasticidade é bem menor do que as outras fibras geralmente utilizadas. Esse baixo módulo de elasticidade não recomenda que a fibra de polipropileno seja utilizada com o objetivo de aumentar a rigidez dos materiais ou a resistência pré-fissuração. Fibras de polipropileno são resistentes a variados produtos químicos e também aos álcalis (SPECHT, 2000).

As fibras de aço, de acordo com Figueiredo (2000), classificam-se como fibras de alto módulo. Por isso, esse tipo de fibra é destinado ao reforço primário do concreto, isto é, não se aplicam somente à reduzir a fissuração ou aumentar a resistência ao impacto do material, como também, são capazes de possibilitar um ganho do desempenho quanto ao seu reforço mecânico. As fibras de aço agem especialmente na pós-fissuração do concreto, servindo como pontes de transferências de tensão nas fissuras, possibilitando uma diminuição da velocidade de propagação destas fissuras.

As fibras de vidro surgiram como uma alternativa atraente para fortalecer o concreto, de modo a produzir um compósito com o objetivo de substituir o cimento amianto. A fibra de vidro também não absorve umidade, não é inflamável, apresenta boa durabilidade, e não varia suas dimensões em relação à temperatura, tudo isso, sem alterar sua resistência mecânica. Bernardi (2003) aponta que a fibra de vidro pode ser produzida por inúmeras técnicas, variando de procedimentos manuais simples até sistemas com alto grau de sofisticação. As propriedades desse tipo de fibra são influenciadas por fatores como o método de manufatura e a sua composição química. Sua utilização no concreto com teores entre 3% e 6% de fibra, resulta em compósitos que apresentam ótimas propriedades acústicas e térmicas.

2.2.2 Borracha de pneus

Atualmente, uma das principais preocupações no ramo da construção civil é dar um destino correto aos resíduos, o que vem levando à conscientização de gestores e profissionais sobre as vantagens da reciclagem, ponto essencial para o crescimento da economia e também da preservação da qualidade de vida das pessoas. Segundo Pereira *et al.* (2015), o descarte inadequado dos pneus inúteis nos aterros sanitários tem causado prejuízos à natureza, explicado pelo fato de que os pneus são combustíveis que queimam em temperaturas elevadas, além de que contribuem para a contaminação de lençóis d'água e de solos e para a proliferação de roedores e insetos.

Desta forma, a inserção de resíduos em misturas de água, cimento e solo surge como uma alternativa para amenizar impactos ambientais. Um exemplo desses resíduos é o de borracha de pneus, produzido em abundância por meio do processo de recauchutagem. Carvalho *et al.* (2006) cita que, em decorrência do uso indiscriminado da areia natural, vem ocorrendo a exaustão de reservas naturais em diversos locais.

Com a melhora da conscientização da população pela preservação da saúde pública e do meio ambiente, estudos vêm analisando a potencialidade de aplicação de resíduos de borracha como agregado nas argamassas e concretos. Estes representam um avanço para o meio ambiente e para o setor de construção civil, auxiliando na remoção dos resíduos da natureza e reduzindo a extração de materiais naturais para produção de produtos utilizados nas construções (KURZ *et al.*, 2018).

De acordo com Sukontasukkul e Chaikew (2005), a troca de agregados por fibra de borracha para a produção de elementos de concreto na pavimentação resulta num material durável e economicamente viável, sendo capaz de absorver mais energia quando é submetido a impactos.

Os pneus podem ser transformados em fibras de borracha e incorporados ao asfalto para pavimentar estradas, pistas de pouso, de decolagem, de corrida e em playgrounds. A vida útil da pavimentação pode aumentar de 4 a 5 vezes só com o

acrécimo das fibras. Campos e Jacintho (2010) afirmam que o concreto com a adição de fibras de borracha dispõem de uma maior resistência ao surgimento e desenvolvimento de fissuras. Os prejuízos mecânicos devido à incorporação de borracha foram admissíveis, até o teor de 10% de acréscimo. Na Figura 7 é possível verificar as fibras de borracha de pneu com dois comprimentos diferentes.

Figura 7 - Diferentes tamanhos de fibras de borracha de pneus



Fonte: Santos (2005).

2.2.2.1 Características

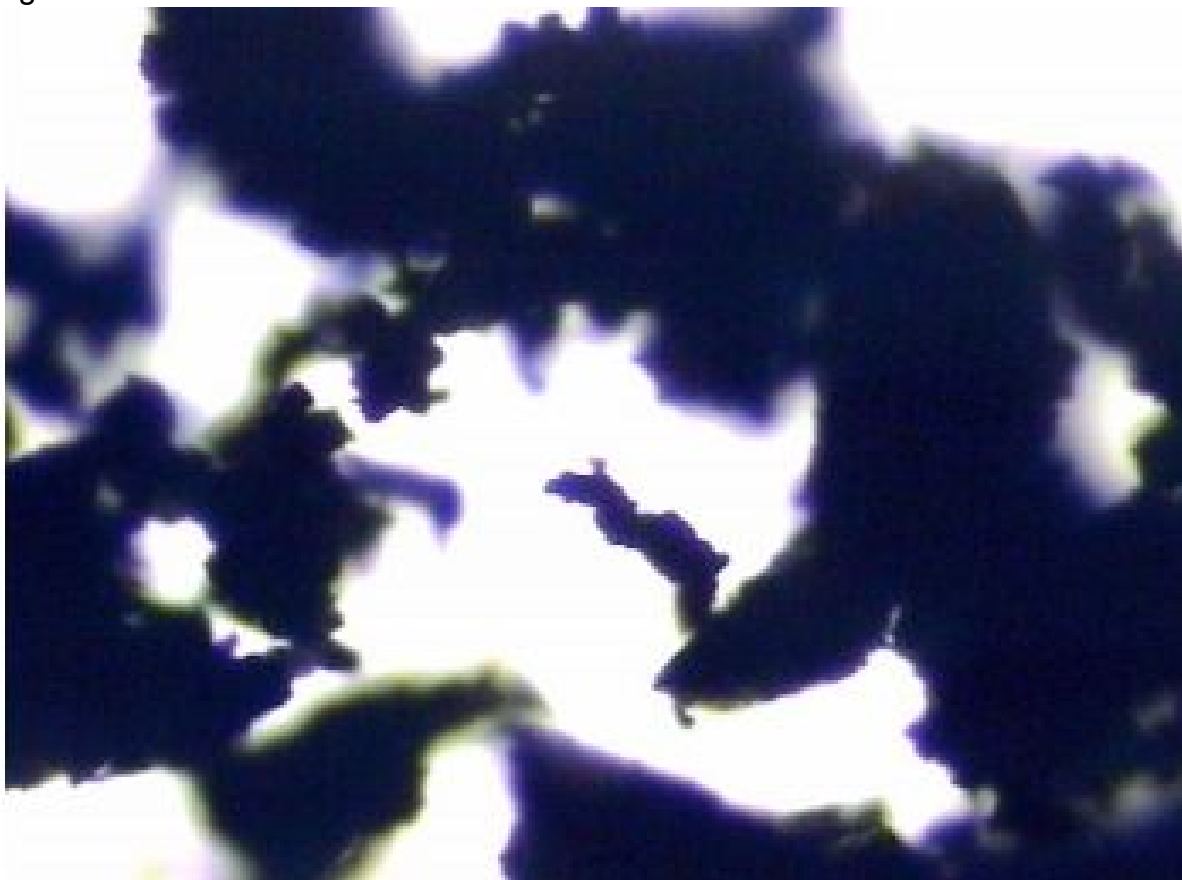
De acordo com Brino (2010), a borracha crua possui características indesejáveis, como a baixa resistência à tração, da mesma maneira que às variações de temperatura e as deformações permanentes. Porém, com o descobrimento do processo de vulcanização, sendo adicionado enxofre à borracha, esse quadro foi revertido. A característica ímpar da borracha natural deriva das misturas adequadas de alguns produtos e também do processo de vulcanização, e suas propriedades mais importantes são:

- Alta tenacidade;
- Não ser condutora de energia elétrica e térmica;
- Grande resistência à abrasão;
- Grande resistência à tração;
- É impermeável à água;
- Possui resiliência.

O resíduo proveniente da recauchutagem produz fibras de borracha que contém tamanhos e espessuras variadas. Para efeito de fibra, à que possui baixa relação comprimento/diâmetro é menos vantajosa. Por outro lado, a retirada deste material pode ser imprópria por ambos motivos: o processo de peneiramento pode vir a não ser eficiente e o percentual é pequeno (SANTOS, 2005).

As fibras de borracha apresentam características particulares em comparação com as fibras usuais. Conforme cita Santos (2005), elas são fibras curtas com superfícies muito irregulares, possuindo ainda pequenas dimensões, que assemelham-se a um pó. As irregularidades de sua superfície tem em sua composição tentáculos e reentrâncias, dando ao material capacidade de prender-se, como nas fibras usuais. Pode-se analisar isto quando compara-se a massa unitária ($0,30 \text{ kg/m}^3$), com a massa específica ($1,14 \text{ kg/m}^3$). Na Figura 8 é possível analisar a superfície da fibra de borracha aumentada 100 vezes por meio de um microscópio.

Figura 8 - Fibras de borracha aumentadas 100 vezes



Fonte: Santos (2005).

2.2.2.2 Processo de produção

No Brasil, as resoluções 258 (1999), 301 (2002), e 416 (2009) do CONAMA impõem aos fabricantes de pneus promover a correta destinação de pneus inaproveitáveis (aqueles sem condições de serem utilizados para reforma ou circulação nas vias).

De acordo com Feio (2013), a recapagem é uma opção para o reaproveitamento do pneu, ou seja, uma forma de reciclagem. Esse processo baseia-se no reaproveitamento da estrutura resistente por meio da raspagem do pneu gasto, de forma a prepará-lo para ser empregada uma nova borracha. Dentre as fases deste processo, é na primeira que surge o resíduo do pneu, no caso as fibras, que serão adicionadas posteriormente ao concreto.

Outra opção para a reutilização dos pneus usados é a recauchutagem. Neste processo, o ciclo de vida dos pneus usados aumenta, a partir do instante em que a banda de rodagem é retirada, já gasta, e inserida uma nova. Esta alternativa não vem sendo muito empregada por usuários de veículos leves, entretanto, as empresas com frotas de veículos pesados e o ramo aeronáutico beneficiam-se bastante com a aplicação desse processo. Segundo Silva (2007), a recauchutagem é uma alternativa bastante viável, porque além de prolongar a vida útil dos pneus, colabora para a diminuição de recursos naturais, ou seja, matérias-primas e energia, isso quando comparada com a fabricação de um pneu novo.

No processo de recauchutagem, o pneu gasto chega à indústria e ganha um tratamento de limpeza em sua superfície, para analisar sua qualidade atual. Logo após esta etapa, é verificado o desgaste e a usabilidade do pneu, onde são avaliados os seguintes fatores: cabo rompido no flanco, danos superficiais, desgaste excessivo na banda de rodagem, alteração de talão, lote e validade, deslocamento de cinta e danos que comprometem a carcaça. Após a aprovação, o pneu vai para um equipamento onde a banda de rodagem é raspada. É nesta etapa de raspagem que surge a fibra da borracha, a qual é sugada e levada para armazenamento em um local apropriado, onde será reaproveitada (SAAD *et al.*, 2017).

Na Figura 9 verifica-se o processo de recauchutagem do pneu, onde a banda de rodagem será raspada posteriormente para a obtenção dos resíduos da

borracha. Já na Figura 10 pode-se observar um local apropriado para o armazenamento da fibra de borracha.

Figura 9 - Processo de recauchutagem do pneu



Fonte: Feio (2013).

Figura 10 - Local de armazenamento das fibras



Fonte: Saad *et al.* (2017).

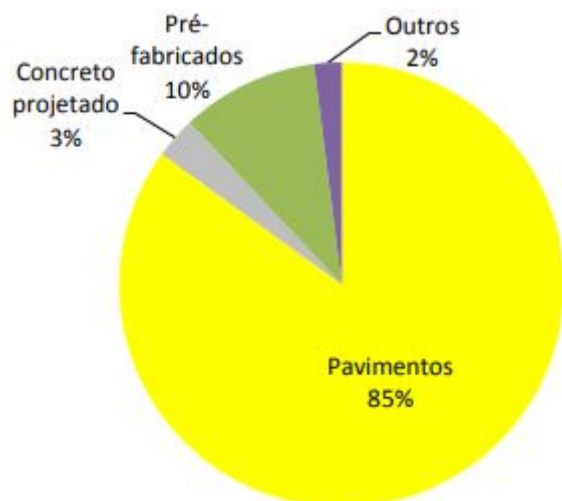
2.3 Concreto com fibras

De acordo com Isaia (2005), o concreto dispõe de uma série de atributos que lhe garante a posição de material estrutural mais empregado no mundo. Entretanto, este apresenta um grande número de limitações, como o comportamento demasiadamente frágil e também uma capacidade baixa de se deformar antes de ocorrer a sua ruptura. Como fruto de sua fragilidade, a resistência à tração do concreto é muito baixa quando comparada com à sua resistência à compressão. Por esse motivo, o uso de fibras na mistura do concreto é uma alternativa técnica que pode vir a ser empregue para que ocorra a minimização dessas limitações.

O primeiro concreto com fibras usado para fins estruturais foi executado no ano de 1971, conforme relatam Mehta e Monteiro (2008), com o objetivo de produzir painéis desmontáveis. Esse concreto continha em sua massa 3% de fibras de aço estiradas a frio, às quais tinham 0,25 mm de diâmetro e 25 mm de comprimento. Os painéis foram usados na garagem de um estacionamento do aeroporto de Heathrow, em Londres, na Inglaterra.

Muitas das aplicações do concreto reforçado com fibras estão relacionadas à obras de grande necessidade social, as quais acabam virando carências da sociedade brasileira. As obras de infraestrutura são um exemplo claro disso, principalmente as de transporte e de saneamento básico. Numa pesquisa realizada por Figueiredo (2011), com os mais importantes fabricantes e representantes brasileiros de fibras adicionadas ao concreto, foi possível analisar que as aplicações deste tipo de concreto são muito concentradas. Como pode-se constatar na Figura 11, o mercado brasileiro de fibras, neste caso as de aço, tem os pavimentos industriais como principal aplicabilidade. Em seguida, vem o concreto projetado e, logo após, os pré-moldados, compondo quase toda a totalidade das aplicações de fibras de aço no Brasil.

Figura 11 - Distribuição do mercado brasileiro de fibras de aço entre 2009 e 2010

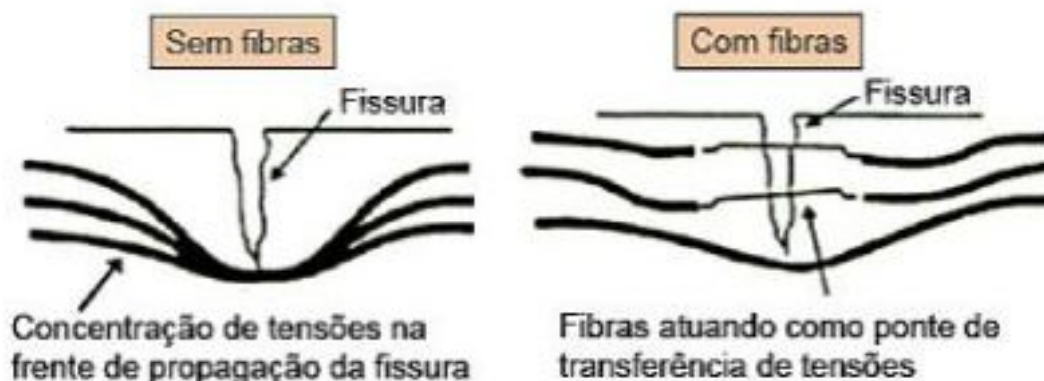


Fonte: Figueiredo (2011).

Muitos fatores influenciam nas características do concreto com fibras. Os mais relevantes são: as propriedades da matriz do concreto, as propriedades geométricas e físicas, os teores das fibras usadas, e também a interação entre a matriz e as fibras. Os processos de adensamento e lançamento também são aspectos significativos, pois influenciam na direção e na distribuição das fibras na matriz. Com a aplicação de fibras, assegura-se menores fissurações no concreto. Com esse fato, pode-se recomendar a utilização de fibras até mesmo em concretos armados, como uma armadura de complemento, para reduzir a fissuração do material (MEDEIROS, 2012).

A eficácia do complemento de fibras na matriz cimentícia pode ser especificada em duas etapas: pré e pós-fissuração. Nos dois casos, o desempenho é controlado pela interação dos dois materiais, da fibra e da matriz cimentícia, por meio de processos de transferência de carga da matriz para as fibras, e também de mecanismos que “costuram” as fissuras. Isto é, segundo Garcez (2005), para o compósito apresentar um bom desempenho, é fundamental garantir que os componentes trabalhem em conjunto. Uma boa interação fibra-matriz resulta no aumento da eficiência da absorção de energia deste compósito. Na Figura 12 é possível analisar como as fibras atuam como pontes de transferência das tensões nas fissuras do concreto.

Figura 12 - Atuação das fibras nas fissuras do concreto



Fonte: Garcez (2005).

2.3.1 Polipropileno

A tecnologia do uso de fibras de polipropileno como elementos reforçando o concreto vem apresentando um aumento considerável de demanda nos últimos anos, e têm experimentado no Brasil, um aumento significativo de seu uso. Na atualidade é possível mencionar diversas obras que tiveram acrescentadas fibras de polipropileno na composição do concreto, como: pontes, túneis, barragens, estações de tratamento de água e de esgoto, canais de irrigação e, principalmente, em pisos e pavimentos de concreto. Diversos motivos evidenciam esta realidade. No plano técnico, cita-se a compatibilidade física, química e mecânica entre o concreto e esse tipo de fibra. O polipropileno não absorve água, é quimicamente inerte, não oxida e também não se deteriora. A mistura destes materiais enquadra-se perfeitamente na ideia de compósitos fibrosos. Já no plano econômico, o crescimento do emprego de fibras justifica-se pela fácil disponibilidade e pelo baixo custo. A resina de polipropileno é mais barata em comparação à outros polímeros, além de que, o processo de produção do fio de polipropileno também é mais em conta financeiramente. Somando a isto, leva-se em consideração também que o seu manuseio, tanto na obra como na fábrica, não oferece nenhum dano à saúde dos operários que trabalham com ele (RODRIGUES; MONTARDO, 2002).

Kumar *et al.* (2013) afirmam que os tipos mais comuns de fibras de polipropileno são: fibriladas, monofilamento e multifilamento. As fibriladas são

produzidas em forma de filme e usadas de modo que podem ser ampliadas em rede aberta. Já as outras duas são produzidas por meio de um processo de extrusão, com seus diâmetros entre 10 e 40 μm . As monofilamentos são produzidas em um único filamento, já as multifilamentos da combinação de vários. Os vários tipos de fibras são confeccionadas com o comprimento desejado, normalmente entre 3 a 20 mm.

Segundo uma pesquisa realizada por Padron e Zollo (1990) sobre concretos e argamassas com o reforço de fibras de polipropileno, eles obtiveram para o concreto, que a diminuição da quantidade de fissuras alternou entre 18% e 23%, ao mesmo tempo que a retração total dos corpos de prova alternou de 52% a 100% em relação ao padrão de concreto simples. Curiosamente, o modelo com fibras que apontou a mesma retração do padrão, apresentou a menor quantidade de fissuras, 18% em comparação com a do concreto simples.

A incorporação de fibras de polipropileno, em baixas quantidades, apesar de não ajudar no aumento da resistência mecânica adequadamente, melhora o desempenho do concreto em comparação a solicitações dinâmicas e, sobretudo, é atribuído a elas a capacidade de diminuição da área de fissuras relacionadas à retração. Conforme Tanesi e Figueiredo (1999), os mecanismos de decrescimento da fissuração por retração necessitam ser analisados para um melhor entendimento do comportamento do compósito e para se avaliar o grau de colaboração das fibras na diminuição das fissuras por retração, visto que ocorre divergência nos resultados de um pesquisador para outro, devido ao fato de ocorrer a utilização de metodologias diferentes entre eles. Apesar da falta de concordância, as fibras de polipropileno têm sido aplicadas em teores fixos de 0,1% em relação ao volume total do concreto, independentemente do desempenho esperado.

Durante um incêndio, o concreto ficará exposto à grandes temperaturas, podendo chegar facilmente acima dos 500°C, e devido às fibras terem seu ponto de fusão em torno de 160°C e o ponto de ignição perto dos 350°C, elas acabam por volatilizar e gerar novos poros e microfissuras que ligam os poros já existentes. Rosa Filho *et al.* (2017) verificaram que o aumento da permeabilidade de um concreto com adição de fibras com 0,15% de volume podem atingir valores de até 12 vezes, em

comparação com um concreto sem adição de fibras. Dessa maneira, a melhora do aumento da permeabilidade diminui a probabilidade do efeito *spalling*.

O primeiro caso documentado da utilização de fibras de polipropileno em um pavimento rígido viário no Brasil como alternativa para diminuição das fissuras por retração ocorreu em Porto Alegre, na Avenida Terceira Perimetral, com início em novembro de 1999. Segundo Rodrigues e Montardo (2002), após o trecho 1 ter sido concluído, houve a ocorrência de diversas fissuras de retração por toda sua extensão, ocasionando prejuízos financeiros ao consórcio que executou o pavimento, o qual teve que aplicar posteriormente resina epóxi para diminuir os problemas ocasionados por essa patologia. Já no trecho 2, optou-se pela utilização de fibras de polipropileno acrescentadas ao concreto para evitar tais fissuras, mesmo que não tenha sido especificado no projeto original. O resultado do acréscimo de fibras foi bastante satisfatório. Na Figura 13 verifica-se a execução deste pavimento de concreto com a adição as fibras de polipropileno.

Figura 13 - Execução de pavimento rígido da Avenida Terceira Perimetral com fibras de polipropileno



Fonte: Rodrigues e Montardo (2002).

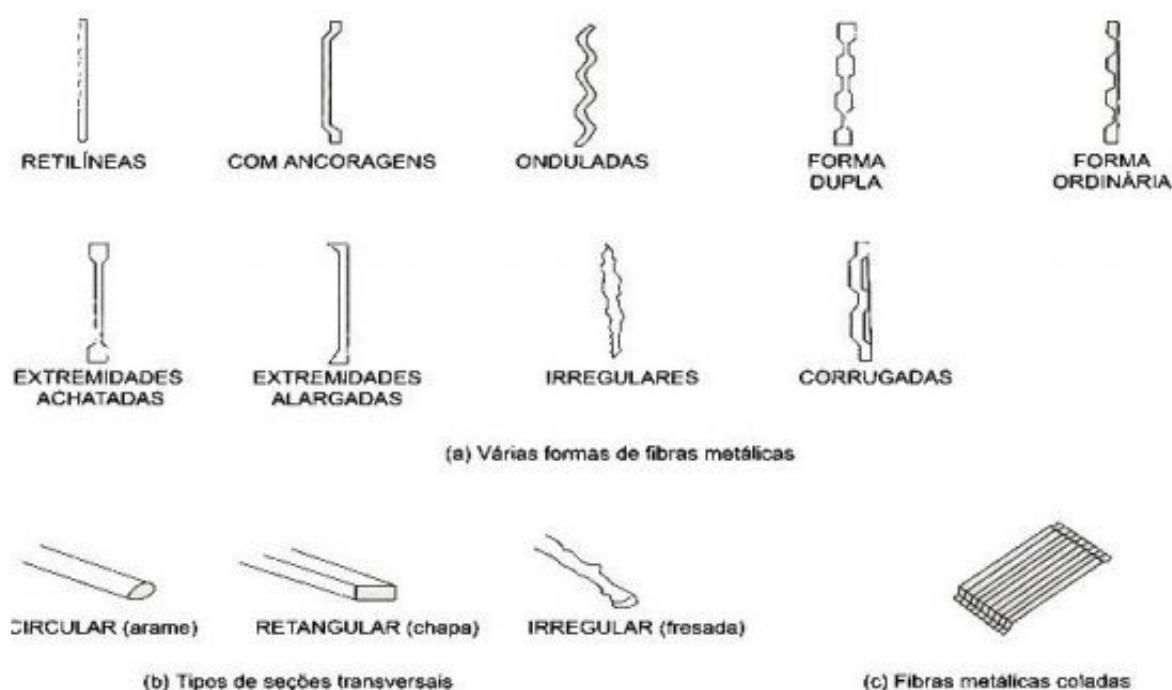
2.3.2 Aço

As fibras de aço são definidas como, comprimentos distintos de aço, em que existe um fator de forma (relação comprimento/diâmetro) que fica entre as faixas de 20 a 100. Conforme cita a American Concrete Institute (1996), elas possuem

diversas formas em sua seção transversal e também dimensão suficiente para serem espalhadas aleatoriamente e misturadas ao concreto fresco. Os objetivos principais dessa incorporação entre os dois materiais é aumentar a resistência à flexão, aumentar a resistência ao impacto e à fadiga e controlar a fissuração do concreto.

O concreto com reforço de fibras de aço já vem sendo utilizado há vários anos no Brasil. A aplicação deste tipo de fibra em concretos para pavimentos, pisos e radiers tem aumentado muito recentemente, em virtude da simplicidade de sua aplicação na mistura, a qual pode ser fabricada tanto em usinas quanto nas próprias obras, com a utilização de betoneiras. De acordo com Moscatelli (2011), no Brasil comercializa-se alguns tipos distintos de fibras de aço. Um desses tipos é a fibra de aço corrugada, que é indicada para melhorar a aderência entre a fibra e a matriz. Elas possuem um baixo custo e quase não interferem na consistência do concreto. Na Figura 14 verifica-se outros tipos de fibras de aço que podem ser empregadas para reforçar o concreto, cada uma com suas características e vantagens para tais utilizações.

Figura 14 - Diferentes formatos de fibras de aço



Fonte: Moscatelli (2011).

O uso do concreto reforçado com fibras de aço em pavimentos pode ser considerado uma das principais aplicações no Brasil, junto com o revestimento de túneis. Isso deve-se a certas vantagens tecnológicas do emprego das fibras de aço em pavimentos, como por exemplo, segundo Isaia (2005), eliminar a etapa de execução da armadura, o que acarretará na redução do tempo total de execução da obra e também na diminuição do número de operários para tal serviço. Haverá também maior espaço físico na obra, já que não será necessário estocar armadura.

As fibras de aço, quando acrescentadas ao concreto, dificultam o desenvolvimento das fissuras devido ao seu alto módulo de elasticidade. Pela aptidão portante pós-fissuração que o compósito exhibe, as fibras admitem uma redistribuição de esforços no material igualmente quando usada em baixos teores. Isto é especialmente interessante em estruturas contínuas como revestimento de túneis e em pavimentos. Para um melhor entendimento deste comportamento, deve-se recordar que o concreto, por ser um material frágil, apresenta-se sempre sujeito à concentração de tensões quando uma fissura surge e se propaga, a partir do crescimento da tensão a ele imposta (FIGUEIREDO, 1997).

Além do fator da forma e o teor da fibra, existem outros critérios relevantes que influenciam na resistência à tração dos compósitos, como o processo de mistura adotado, a geometria da fibra e a forma de ligação entre a matriz de concreto e a fibra. De acordo com Bentur e Mindess (2007), um volume de 5% de fibras retas e lisas de aço com sua orientação na direção da tração pode promover um aumento na resistência de até 130%. Quando se distribui as fibras aleatoriamente, o aumento é mais contido, podendo atingir valores em torno de 60%, levando em conta um teor de 5% de fibras de aço.

O custo benefício do concreto reforçado com fibras de aço é muito satisfatório, porém, ele encontra-se apenas nas obras de grande porte. Uma grande adversidade é a diminuição da trabalhabilidade, um importante condicionante da produtividade em uma obra, todavia o mercado já dispõe de técnicas que auxiliam na trabalhabilidade do concreto, como os superplastificantes e também o concreto reforçado com fibras de aço. Percebe-se que sua utilização é mais difundida nos países europeus, particularmente devido à sua cultura. Entretanto, o concreto reforçado com fibras de aço é uma excelente solução para países quentes como o

Brasil, em virtude da mudança de temperatura ser um dos fatores principais da origem de fissuras (BRAZ; NASCIMENTO, 2015).

2.3.3 Borracha de pneus

Uma das opções para o reaproveitamento da borracha do pneu, esgotadas as chances de recauchutagem, é a sua aplicação em compostos cimentícios, pelo fato de ser um material que pode absorver impactos, contribuindo na melhoria das propriedades mecânicas. De acordo com Carvalho *et al.* (2018), quando adiciona-se fibras de borracha ao concreto simples, ocorre uma transformação nas propriedades de consistência do concreto, em consequência, ocorre redução na sua trabalhabilidade. Isso acontece por que quando se adiciona as fibras ao concreto, está adicionando-se uma área superficial grande, a qual demanda água de molhagem e, além do mais, a presença das fibras de borracha aumenta a resistência mecânica nos procedimentos de vibração do concreto e mistura dos materiais, que dependem da rigidez e da geometria das fibras.

Um estudo realizado por Campos e Jachinto (2010) analisou que a adição de fibra de pneu ao concreto diminui a resistência do mesmo, e não ocorre de forma linear à adição dessas fibras. O grande benefício dessa mistura, quando comparada aos concretos usuais, está na melhor condição de deformabilidade, graças à redução do seu módulo de elasticidade longitudinal.

Jachinto *et al.* (2012) verificou que a diminuição na resistência mecânica em concretos com incorporação de borracha é menor em relação à tração na flexão e maior quanto à compressão, podendo chegar a uma redução de 15% na resistência à tração na flexão e até 36% na resistência à compressão. Já César *et al.* (2006) analisou que a utilização de resíduos de borracha em substituição com relação à massa de cimento interfere no crescimento da resistência à tração na flexão em 40% e redução de 34% na resistência à compressão.

Garrick (2005) afirma que a inclusão das fibras de borracha está sendo pesquisada cada vez mais com o objetivo de aumentar a resistência à tração do concreto, pois os resíduos de pneu tem a alta tenacidade como principal propriedade. Além da preocupação de preservar suas propriedades mecânicas, há

também a necessidade de que os concretos tornem-se mais resistentes aos ataques do ambiente, designado como concreto de alto desempenho.

Segundo Batayneh *et al.* (2008), o acréscimo de borracha em misturas cimentícias amplia sua capacidade de deformação sem que ocorra o surgimento de fissuras. Foi observado pelos autores um comportamento não linear no diagrama tensão-deformação das amostras com adição das fibras de borracha, constatando que o material proporciona um crescimento da tenacidade dos compósitos. As fibras de borracha, por serem um material altamente elástico, agem como empecilhos para a propagação de fissuras, ocasionando num efeito de “costura”.

Para Giacobbe (2008), no ramo da construção civil, o uso de pneus mostra ser uma alternativa tecnologicamente vantajosa, permitindo adaptá-lo como agregado na fabricação de concretos de cimento Portland. Segundo a autora, uma possibilidade para aplicar esse tipo de resíduo são os concretos atribuídos à pavimentação, onde a fibra de borracha acrescida colabora para minimizar problemas comuns específicos para esse tipo de estrutura, isto é, comportamento rígido e fácil de fissurar em baixas idades em decorrência da retração plástica.

Hernández-Olivares *et al.* (2002) verificaram que ocorreu redução do módulo de elasticidade do concreto com o aumento da quantidade de borracha. Perceberam ainda, que quando a tensão máxima é alcançada, as fibras de borracha contribuem para evitar a reprodução das fissuras e que há um crescimento da energia absorvida pela deformação, com conseguinte diminuição da sonoridade. A Figura 15 apresenta o *Slump Test* de um concreto com fibras de borracha de pneu.

Figura 15 - Concreto com fibras de borracha de pneu



Fonte: Moreira *et al.* (2014).

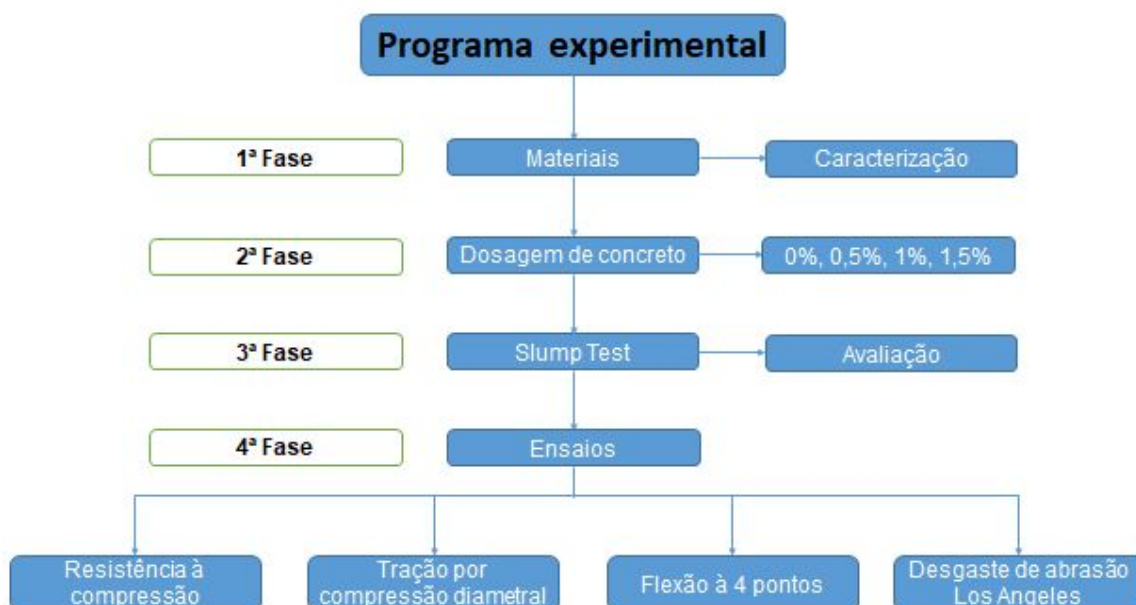
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Programa experimental

Este programa experimental foi dividido em 4 fases, sendo que a 1ª Fase tratou-se dos materiais que constituíram o concreto, bem como sua caracterização. A escolha dos materiais é muito importante para determinar as propriedades do concreto e para qual finalidade ele será empregado, sendo neste caso, para pavimentos rígidos. A 2ª Fase abordou a dosagem do concreto, onde cada material selecionado na 1ª Fase teve sua proporção definida conforme o traço. Após ter sido definido o traço e as quantidades de material necessário para preencher todos os corpos de prova, eles foram pesados em balança, seguindo rigorosamente o que foi calculado por meio da planilha de cálculos Excel. A 3ª Fase do programa referiu-se à avaliação do *Slump Test*. O teste de abatimento pelo tronco de cone foi realizado logo após o concreto ter sido produzido na betoneira, ou seja, no seu estado fresco, e para pavimentos rígidos o seu valor deve estar na faixa dos 60 a 80 mm de deformação em relação à altura total do tronco de cone. Na 4ª Fase e última, foram realizados 4 ensaios no Laboratório de Tecnologia da Construção - LATEC da Univates. Os ensaios de resistência à compressão, de resistência à tração por compressão diametral, de flexão a 4 pontos e de desgaste abrasivo pelo método de abrasão Los Angeles foram realizados com o objetivo de comparar os resultados dos quatro traços diferentes, com as proporções distintas de fibra em cada um deles para analisar se a fibra auxilia no reforço mecânico do concreto, e caso seja afirmativo, qual a melhor porcentagem a ser aplicada neste concreto. A Figura 16

apresenta o fluxograma do programa experimental deste estudo, com todas as fases e suas características bem identificadas.

Figura 16 - Fluxograma do programa experimental



Fonte: Autor (2019).

3.2 Materiais

O concreto produzido em laboratório foi composto por 7 tipos diferentes de materiais, cada um deles com suas particularidades e com as proporções específicas calculadas de acordo com o traço. Nos itens seguintes, será descrito cada tipo de material que compôs esse concreto, sendo eles: o cimento, a areia (fina e média), a brita, o aditivo, a água e o principal material deste estudo, a fibra de borracha de pneus. Todos os ensaios feitos com esses materiais foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Construção - LATEC da Univates.

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado na fabricação do concreto foi o CP V-ARI - Cimento Portland de alta resistência inicial. O cimento CP V-ARI é regulamentado pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018). Executou-se o teste de massa específica do cimento seguindo as diretrizes da norma NBR 16605 (ABNT, 2017). É utilizado o frasco de

Le Chatellier para a realização deste ensaio, e seguindo a norma, o ensaio foi realizado duas vezes, pois é exigido que não haja uma diferença maior que 0,02 g/cm³ entre eles. A massa específica do cimento CP V-ARI resultou em 2,99 g/cm³, conforme apresentado na Equação 1.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{V'_2 - V'_1} = \frac{53,135}{18,3 - 0,5} = 2,99 \text{ g/cm}^3 \quad (1)$$

Onde:

ρ : é a massa específica do material ensaiado (g/cm³);

m : é a massa do material ensaiado (g);

V : é o volume deslocado pela massa do material ensaiado (cm³);

$V'_2 - V'_1$: são os valores corrigidos de V_2 e V_1 , respectivamente, a partir da calibração da escala do frasco volumétrico (cm³).

3.2.2 Areia

Como agregado miúdo, empregou-se uma areia fina osório, comprada diretamente da empresa Britagem Cascalheira, a qual possui granulometria entre 0,05 e 0,42 mm de diâmetro, e também uma areia média, disponibilizada pelo LATEC, com granulometria entre 0,42 e 2 mm, secadas em estufa na temperatura de 105° durante 24 horas, para que a umidade não interferisse nos resultados. Além da escolha pelas areias fina e média, também foram realizados três tipos de ensaio com essas areias: o de massa específica, massa unitária e o de granulometria. O objetivo foi analisar as propriedades de cada um desses materiais. A normatização do primeiro ensaio é feita pela NBR NM 52 (ABNT, 2009), a do segundo pela NBR NM 45 (ABNT, 2006) e a do último é cumprida pela NBR NM 248 (ABNT, 2003).

A massa específica da areia fina é igual a 2,59 g/cm³, de acordo com a Equação 2, já a massa específica da areia média resultou no valor de 2,40 g/cm³, conforme apresentado na Equação 3.

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} = \frac{495,9}{(500 - 304,2) - \frac{500 - 495,9}{1}} = 2,59 \text{ g/cm}^3 \quad (2)$$

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} = \frac{495}{(500 - 288,9) - \frac{500 - 495}{1}} = 2,40 \text{ g/cm}^3 \quad (3)$$

Onde:

d_3 : é a massa específica do agregado (g/cm³);

m : é a massa da amostra seca em estufa (g);

m_s : é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

V : é o volume do frasco (cm³);

V_a : é o volume de água adicionada ao frasco (cm³);

ρ_a : é a massa específica da água (g/cm³).

A massa unitária da areia fina é igual a 1,494 g/cm³, de acordo com a Equação 4, já a massa unitária da areia média resultou no valor de 1,497 g/cm³, conforme apresentado na Equação 5. Ambas com valores quase idênticos.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} = \frac{13,674 - 8,847}{0,00323} = 1494,45 \text{ kg/m}^3 = 1,494 \text{ g/cm}^3 \quad (4)$$

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} = \frac{13,643 - 8,805}{0,00323} = 1497,85 \text{ kg/m}^3 = 1,497 \text{ g/cm}^3 \quad (5)$$

Onde:

ρ_{ap} : é a massa unitária do agregado (kg/m³);

m_{ar} : é a massa do recipiente + agregado (kg);

m_r : é a massa do recipiente vazio (kg);

V : é o volume do recipiente (m³).

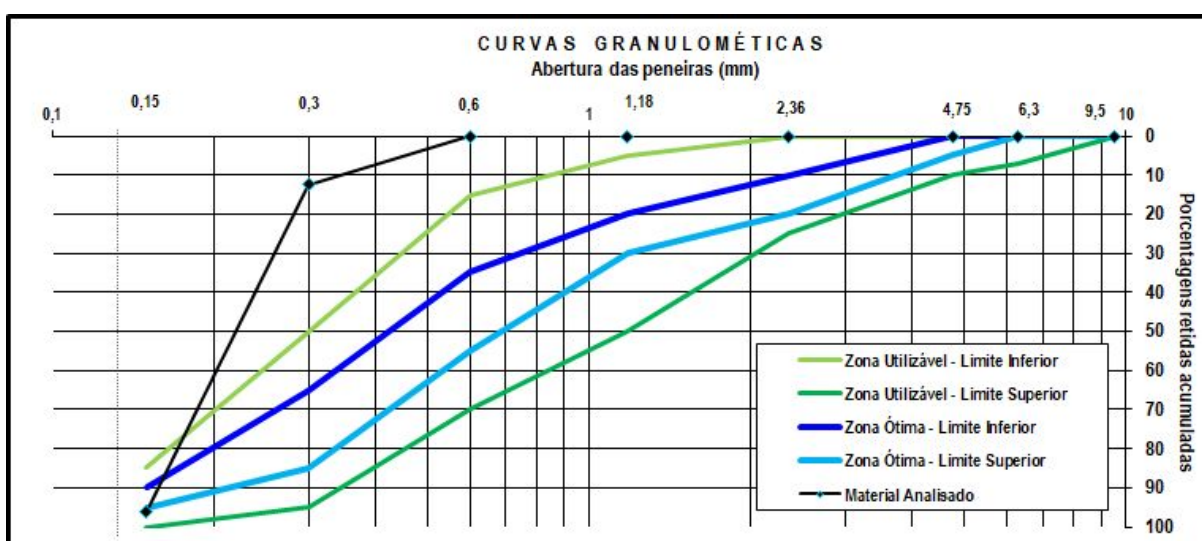
O ensaio de granulometria da areia fina resultou num módulo de finura de 1,08. O diâmetro máximo é igual a 600 µm (malha 30), onde a porcentagem retida acumulada foi de 0,00%. Na Tabela 1 observa-se os valores encontrados no ensaio de granulometria da areia fina, já no Gráfico 1, analisa-se a curva granulométrica deste mesmo material.

Tabela 1 - Composição granulométrica da areia fina

Peneira	Malha	Peso (g)	Peso acum. (g)	% média	% acumulado
9,5mm	3/8"	0,00	0,00	0,00%	0,00%
6,3mm	1/4"	0,00	0,00	0,00%	0,00%
4,75mm	4	0,00	0,00	0,00%	0,00%
2,36mm	8	0,00	0,00	0,00%	0,00%
1,18mm	16	0,00	0,00	0,00%	0,00%
600µm	30	0,00	0,00	0,00%	0,00%
300µm	50	124,10	124,10	12,41%	12,41%
150µm	100	836,50	960,60	83,65%	96,06%
Fundo		39,40	1000,00	3,94%	100,00%

Fonte: Autor (2020).

Gráfico 1 - Curva granulométrica da areia fina



Fonte: Autor (2020).

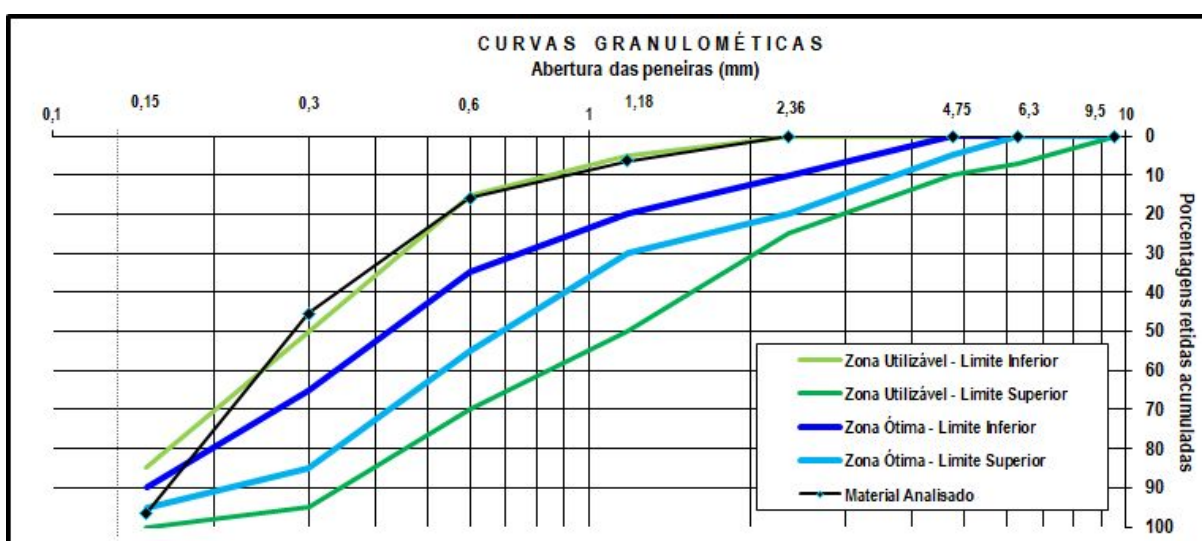
O ensaio de granulometria da areia média resultou num módulo de finura de 1,64. O diâmetro máximo é igual a 2,36 mm (malha 8), onde a porcentagem retida acumulada foi de 0,18%. Na Tabela 2 observa-se os valores encontrados no ensaio de granulometria da areia média, já no Gráfico 2, analisa-se a curva granulométrica deste mesmo material.

Tabela 2 - Composição granulométrica da areia média

Peneira	Malha	Peso (g)	Peso acum. (g)	% média	% acumulado
9,5mm	3/8"	0,00	0,00	0,00%	0,00%
6,3mm	1/4"	0,00	0,00	0,00%	0,00%
4,75mm	4	0,00	0,00	0,00%	0,00%
2,36mm	8	1,80	1,80	0,18%	0,18%
1,18mm	16	61,70	63,50	6,17%	6,35%
600µm	30	94,50	158,00	9,45%	15,80%
300µm	50	297,40	455,40	29,74%	45,54%
150µm	100	509,60	965,00	50,96%	96,50%
Fundo		35,00	1000,00	3,50%	100,00%

Fonte: Autor (2020).

Gráfico 2 - Curva granulométrica da areia média



Fonte: Autor (2020).

3.2.3 Brita

No agregado graúdo, empregou-se uma brita do tipo 1, de 9,5 a 19 mm de diâmetro, originária de basalto, tipo de rocha bastante encontrada no Vale do Taquari. A brita 1 é a classe de agregado graúdo mais utilizada na construção civil, pois pode ser empregada em qualquer tipo de obra. Da mesma maneira que no agregado miúdo, a brita passou pelos ensaios de massa específica, massa unitária e de granulometria, sendo o primeiro normatizado pela NBR NM 53 (ABNT, 2009), o segundo pela NBR NM 45 (ABNT, 2006) e o de granulometria pela NBR NM 248 (ABNT, 2003).

A Equação 6 apresenta a fórmula da massa específica, a qual resultou em 2,89 g/cm³, a Equação 7 informa que a absorção de água deste material é igual a 1,49% e a Equação 8 nos mostra que o valor da massa unitária da brita 1 é de 1,445 g/cm³.

$$d = \frac{m}{m - m_a} = \frac{4925,1}{4925,1 - 3220,4} = 2,89 \text{ g/cm}^3 \quad (6)$$

Onde:

d : é a massa específica do agregado seco (g/cm³);

m : é a massa ao ar da amostra seca (g);

m_a : é a massa em água da amostra (g).

$$A = \frac{m_s - m}{m} * 100 = \frac{4998,5 - 4925,1}{4925,1} * 100 = 1,49\% \quad (7)$$

Onde:

A : é a absorção de água (%);

m_s : é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g);

m : é a massa ao ar da amostra seca (g).

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} = \frac{13,515 - 8,847}{0,00323} = 1445,20 \text{ kg/m}^3 = 1,445 \text{ g/cm}^3 \quad (8)$$

Onde:

ρ_{ap} : é a massa unitária do agregado (kg/m³);

m_{ar} : é a massa do recipiente + agregado (kg);

m_r : é a massa do recipiente vazio (kg);

V : é o volume do recipiente (m³).

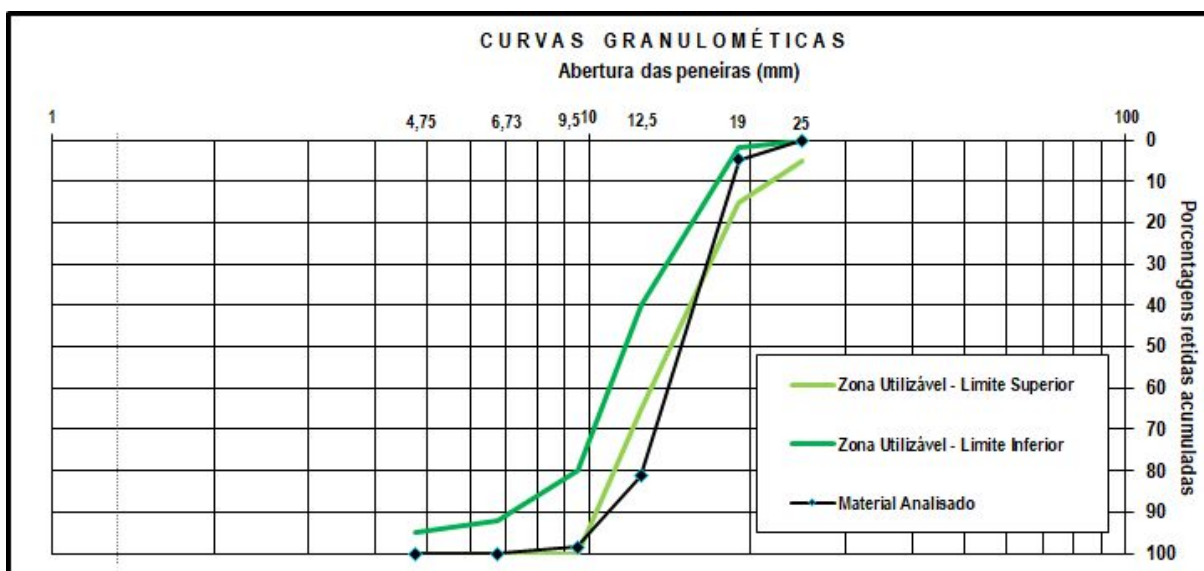
O ensaio de granulometria da brita 1 resultou num módulo de finura de 7,04. O diâmetro máximo é igual a 19 mm (malha 1”), onde a porcentagem retida acumulada foi de 4,79%. Na Tabela 3 observa-se os valores encontrados no ensaio de granulometria da brita 1, já no Gráfico 3, analisa-se a curva granulométrica deste mesmo material.

Tabela 3 - Composição granulométrica da brita 1

Peneira	Malha	Peso (g)	Peso acum. (g)	% média	% acumulado
25mm	1”	0,00	0,00	0,00%	0,00%
19mm	3/4”	143,80	143,80	4,79%	4,79%
12,5mm	1/2”	2296,30	2440,10	76,54%	81,34%
9,5mm	3/8”	513,90	2954,00	17,13%	98,47%
6,3mm	1/4”	46,00	3000,00	1,53%	100,00%
4,75mm	4	0,00	0,00	0,00%	100,00%

Fonte: Autor (2020).

Gráfico 3 - Curva granulométrica da brita 1



Fonte: Autor (2020).

3.2.4 Aditivo

A NBR 11768-1 (ABNT, 2019) e NBR 11768-2 (ABNT, 2019) são as responsáveis por normatizar os tipos de aditivos que são incluídos na produção do concreto. Neste caso, foi utilizado um superplastificante do tipo I para reduzir acentuadamente a água no concreto, auxiliando na fluidez e aumentando sua resistência. Esse material também serviu para dispersar os demais materiais, como por exemplo a fibra de borracha de pneus, ajudando numa melhor trabalhabilidade deste concreto no seu estado fresco, propiciando uma maior durabilidade.

3.2.5 Água

Utilizou-se água de abastecimento público para a produção do concreto, sem nenhum material presente na sua composição, para que não ocorresse nenhuma alteração na resistência e características do concreto. Também foi observada a relação água/cimento para se atingir a resistência projetada. A norma NBR 15900-1 (ABNT, 2009) é a que normatiza a padronização da água para o amassamento do concreto.

3.2.6 Fibra de borracha de pneu

O resíduo da borracha do pneu foi fornecido pela empresa Renovadora de Pneus Luft, que localiza-se no bairro Santo André, na cidade de Lajeado/RS. Esse material é obtido através do processo de recauchutagem, oriundo da banda de rodagem do pneu. Macroscopicamente, foi possível verificar que o material continha diversos comprimentos e diâmetros, e por esse motivo, realizou-se um peneiramento com o material na peneira de 1,18mm (malha 16), com o objetivo de separar o pó da borracha dos elementos fibrosos. Além disso, os materiais muito grandes, que não assemelhavam-se à fibras, também foram retirados e não foram utilizados nos ensaios. Na Figura 17 observa-se as fibras em uma bandeja e os outros materiais que não foram utilizados no estudo em outra. Cabe ressaltar que todo material que não foi aproveitado para a concretagem foi devolvido à empresa Renovadora de Pneus Luft, para que desse os devidos fins de forma correta.

Figura 17 - Fibras separadas do pó da borracha



Fonte: Autor (2020).

Após terem sido peneiradas e separadas, as fibras passaram pelos ensaios de massa específica, massa unitária e de granulometria. De acordo com Santos (2005), como não existem normas específicas para a caracterização desse tipo de material, empregam-se as normas utilizadas nos agregados miúdos. Dessa maneira, seguiu-se as diretrizes das normas NBR NM 52 (ABNT, 2009), NBR NM 45 (ABNT, 2006) e NBR NM 248 (ABNT, 2003), para massa específica, massa unitária e granulometria, respectivamente.

Para a realização do ensaio de massa específica, ao invés de utilizar água, aplicou-se querosene, visto que, a borracha tem baixa capacidade de absorção de água e seu peso específico é bastante semelhante ao deste material. Na Figura 18 observa-se uma das etapas do ensaio de massa específica, onde o frasco estava preenchido em parte pelas fibras e pelo querosene.

Figura 18 - Ensaio de massa específica das fibras



Fonte: Autor (2020).

De acordo com a Equação 9, constata-se que a massa específica da fibra resultou em 0,97 g/cm³, em compensação, a massa unitária deste mesmo material ficou no valor de 0,306 g/cm³, conforme é apresentado na Equação 10.

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} = \frac{54,58}{(500 - 386,08) - \frac{100 - 54,58}{0,79}} = 0,97 \text{ g/cm}^3 \quad (9)$$

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} = \frac{9830 - 8,841}{0,00323} = 306,20 \text{ kg/m}^3 = 0,306 \text{ g/cm}^3 \quad (10)$$

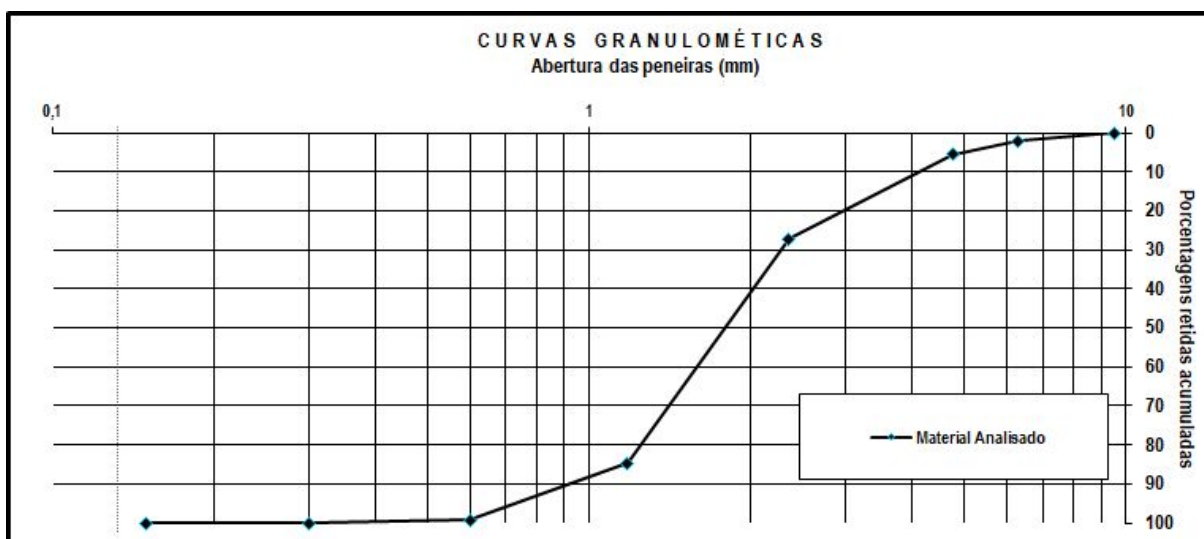
O ensaio de granulometria da fibra resultou num módulo de finura de 4,17. O diâmetro máximo foi igual a 6,3 mm (malha 1/4"), onde a porcentagem retida acumulada foi de 2,06%. Na Tabela 4 observa-se os valores encontrados no ensaio de granulometria da fibra de borracha, já no Gráfico 4, analisa-se a curva granulométrica deste mesmo material.

Tabela 4 - Composição granulométrica da fibra de borracha

Peneira	Malha	Peso (g)	Peso acum. (g)	% média	% acumulado
9,5mm	3/8"	0,00	0,00	0,00%	0,00%
6,3mm	1/4"	6,20	6,20	2,07%	2,07%
4,75mm	4	10,40	16,60	3,47%	5,53%
2,36mm	8	65,10	81,70	21,70%	27,23%
1,18mm	16	172,50	254,20	57,50%	84,73%
600µm	30	43,90	298,10	14,63%	99,37%
300µm	50	1,90	300,00	0,63%	100,00%
150µm	100	0,00	0,00	0,00%	100,00%
Fundo		0,00	0,00	0,00%	100,00%

Fonte: Autor (2020).

Gráfico 4 - Curva granulométrica da fibra de borracha



Fonte: Autor (2020).

3.3 Dosagem do concreto

O concreto produzido tem na sua composição cimento CP V-ARI, areia fina, areia média, brita 1, superplastificante do tipo I, água limpa de impurezas e também a fibra de borracha de pneu, ou seja, 7 materiais com características distintas que formaram o traço final do concreto. O traço deste concreto foi baseado no trabalho desenvolvido por Costa (2015), a qual seguiu as normas do Manual de Pavimentos Rígidos (DNIT, 2005) em relação à resistência característica à tração na flexão para pavimentos de concreto, que é na ordem de 4,5 MPa. Além disso, foram produzidos 4 traços diferentes, com o objetivo de compará-los, para verificar qual a melhor dosagem da fibra de borracha de pneu na mistura e qual deles obteve maior resistência mecânica em relação aos diferentes esforços. O traço referência não teve fibra adicionada em sua composição, e os outros 3 tiveram adicionados 0,5%, 1,0% e 1,5% de fibras em relação ao volume total do concreto. O traço utilizado foi de 1 : 0,96 : 1,45 : 2,27 : 0,01, cimento, areia fina, areia média, brita 1 e superplastificante, respectivamente. A relação água/cimento foi de 0,46. A Tabela 5 apresenta as quantidades de cada material utilizado para a concretagem dos corpos de prova. Analisando-a, é possível verificar que cada traço deu origem a aproximadamente 73,5 litros de volume de concreto e as quantidades de fibras

adicionadas foram de 1,424 kg, 2,848 kg e 4,272 kg, para 0,5%, 1,0% e 1,5%, respectivamente.

Tabela 5 - Quantidade de materiais para a produção do concreto

Material	Kg/m³	Kg/L	Kg (total)	Kg (por traço)
Cimento CP-V	422,00	0,422	123,92	30,98
Areia Média	610,20	0,610	179,20	44,80
Areia Fina	406,80	0,407	119,44	29,86
Brita 1	958,40	0,958	281,43	70,36
Aditivo	2,80	0,002	0,824	0,206
Relação a/c	0,460	0,460	57,04	14,26
Fibra de borracha	970,00	0,970	284,83	
			0,5%	1,424
			1,0%	2,848
			1,5%	4,272
Corpo de Prova	Litros	Quantidade	Total	Unidade
Cilíndrico 10x20	1,6	84	131,95	Litros
Prismático 15x15x50	11,3	12	135,00	Litros
		Total	266,95	Litros
		Total + 10%	293,64	Litros

Fonte: Autor (2020).

3.4 Procedimentos para moldagem e cura dos CPs

Seguindo as diretrizes das normas NBR 5738 (ABNT, 2015) e NBR NM 33 (ABNT, 1998) que tratam do procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova e também da amostragem do concreto fresco, foi realizada a concretagem dos corpos de prova para os 4 traços identificados anteriormente. A areia fina e areia média foram secadas previamente em estufa para que sua umidade não interferisse na relação a/c.

Inicialmente, os materiais foram pesados em balança, com suas quantidades definidas de acordo com a Tabela 5 e separados para posterior produção do concreto, como é possível verificar na Figura 19. Após isso, foi passado desmoldante nos moldes para posterior adensamento dos corpos de prova.

Figura 19 - Materiais pesados e separados



Fonte: Autor (2020).

Para a produção do concreto, utilizou-se uma betoneira com eixo vertical e capacidade para 250 litros. Primeiramente colocou-se a brita 1 com metade da quantidade de água, ligando a betoneira e, logo após, acrescentou-se toda a quantidade de cimento do traço junto a dois baldes de areia e misturou-se novamente o material. Após um minuto em mistura, inseriu-se o resto da areia faltante e as fibras (nos traços que constam). Por fim, a outra metade da água foi

adicionada. O superplastificante foi colocado aos poucos para ir melhorando a trabalhabilidade do concreto. A Figura 20 apresenta os corpos de prova já moldados.

Figura 20 - Moldagem dos CPs



Fonte: Autor (2020).

Depois de ser produzido, o concreto passou pelo *Slump Test* e logo após, foi inserido nos moldes, sendo os corpos de prova cilíndricos adensados em 2 camadas de 12 golpes e os prismáticos em 2 camadas de 75 golpes. A cura inicial foi de 24h para os corpos de prova cilíndricos e de 48h para prismáticos, sendo levados posteriormente para uma câmara úmida, seguindo as orientações da NBR 9479 (ABNT, 2006).

3.5 Slump Test

O teste de abatimento pelo tronco de cone, também conhecido por *Slump Test*, é regulamentado pela norma NBR NM 67 (ABNT, 1998) e também pela DNER-ME 404 (DNER, 2000). Depois de produzido, o concreto foi colocado no aparelho do tronco de cone sobre uma superfície de placa metálica, apoiando os pés sobre as hastes inferiores do cone para que o mesmo não se movimenta-se durante a realização do teste. Com o tronco estável e posicionado sobre a placa, iniciou-se a colocação da primeira camada de concreto em seu interior, mais ou menos $\frac{1}{3}$ da sua altura, compactando-a com a haste de adensamento em 25 golpes e, assim ocorreu sucessivamente para as outras duas camadas que tiveram a mesma altura e números de golpes da primeira. Após o preenchimento do cone com o concreto, o mesmo foi rasurado com a régua e o ensaio finalizado com a medição do abatimento. De acordo com o Manual de Pavimentos Rígidos (DNIT, 2005), para concretos de pavimentos rígidos, o ideal é que o abatimento fique na faixa de (70 ± 10) mm. Na Figura 21, é possível notar que o abatimento do concreto referência enquadra-se dentro da faixa ideal.

Figura 21 - Abatimento do concreto referência



Fonte: Autor (2020).

3.6 Ensaios de controle tecnológico

O Laboratório de Tecnologia da Construção da Univates serviu para a execução de quatro ensaios dos concretos no estado endurecido, sendo eles: o de resistência à compressão, de resistência à tração por compressão diametral, de flexão a 4 pontos e também o de desgaste abrasivo pelo método de abrasão Los Angeles. O Quadro 2 apresenta os ensaios que foram realizados, a quantidade e tipos de corpos de prova e as idades de rompimento deles.

Quadro 2 - Ensaios de resistência mecânica

Ensaio	Tipo de CP	Nº CPs	Idades de ruptura	Total de CPs
Compressão	Cilíndrico (10x20cm)	12	7, 21 e 28 dias	36
Tração por comp. diametral	Cilíndrico (10x20cm)	12	7, 21 e 28 dias	36
Flexão a 4 pontos	Prismático (15x15x50cm)	12	28 dias	12
Abrasão	Cilíndrico (10x20cm)	12	28 dias	12

Fonte: Autor (2020).

3.6.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão seguiu os procedimentos citados na norma NBR 5739 (ABNT, 2018). Esta norma é responsável por normatizar o ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, onde o resultado da resistência mecânica destes corpos de prova é informado pela unidade de MPa. O ensaio foi executado no LATEC, com o auxílio de uma prensa de compressão da marca EMIC, modelo PC200CS, conforme é apresentado na Figura 22, com capacidade máxima de até 200 MPa.

Após ocorrer a finalização da cura do concreto nas idades especificadas (que constam no Quadro 2), os corpos de prova foram levados à prensa e submetidos ao esforço de compressão, com o objetivo de se obter a resistência mecânica de cada

um destes CPs, onde foi efetuada uma média dentre os três corpos de prova de cada traço e para cada idade a fim de compará-los.

Figura 22 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autor (2020).

3.6.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio em questão transcorreu da mesma maneira que o ensaio do item 3.6.1, utilizando-se a mesma prensa, porém, ao invés dos corpos de prova serem rompidos no sentido vertical, como ocorreu no ensaio de compressão, neste caso,

eles foram rompidos no sentido horizontal, de acordo com a Figura 23, com o objetivo de obter-se os valores de resistência à tração em MPa. A ruptura ocorreu exatamente no instante em que as duas metades do corpo de prova separaram-se por inteiro, com a máquina informando o valor da resistência à tração do concreto. Foi calculada uma média dos três corpos de prova de cada traço e para cada idade com o objetivo de analisar os resultados. Esse ensaio é normatizado pela NBR 7222 (ABNT, 2011) e também pela Norma 136-ME (DNIT, 2010).

Figura 23 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Autor (2020).

3.6.3 Flexão a 4 pontos

Diferentemente dos outros ensaios de resistência em que os corpos de prova ensaiados são cilíndricos de 10x20cm, no ensaio de flexão a 4 pontos, os corpos de prova são prismáticos, com dimensões de 15x15x50cm e, sua ruptura foi somente aos 28 dias, conforme é indicado no Quadro 2. Após ter sido concluído o período de cura, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e ensaiados imediatamente na mesma máquina utilizada nos ensaios de compressão e de tração por compressão diametral, como constata-se na Figura 24. O ensaio consistiu na colocação dos corpos de prova em dois apoios na sua parte inferior, onde deve haver obrigatoriamente simetria entre as distâncias do lado externo dos apoios inferiores. Em seguida, mais dois apoios foram inseridos em contato com os corpos de prova, desta vez na parte superior, porém, mais centrados em comparação com os inferiores e, foi ali que aplicou-se a carga até a sua ruptura total, sendo que a ruptura deve ocorrer exclusivamente no terço central do corpo de prova. Além de informar a resistência à flexão em MPa, as seções de ruptura foram medidas, com o intuito de estabelecer sua largura e altura, sendo que os resultados foram obtidos através da média das três determinações. A norma que regulamenta esse ensaio é a NBR 12142 (ABNT, 2010).

Figura 24 - Ensaio de flexão a 4 pontos



Fonte: Autor (2020).

3.6.4 Desgaste abrasivo pelo método de abrasão Los Angeles

O ensaio de desgaste abrasivo pelo método Los Angeles é normatizado pela Norma DNIT-ME (DNIT, 2018), e também pela NBR NM 51 (ABNT, 2000). Porém, como o LATEC não possui essa máquina, foi utilizado o moinho de bolas para executar o ensaio de abrasão dos corpos de prova com cura de 28 dias, no entanto, a sistemática do ensaio foi a mesma que se tivesse sido executado pela máquina Los Angeles. Os corpos de prova foram previamente pesados e numerados. Antes de inserir os corpos de prova na máquina, eles tiveram que passar por um processo

de raspagem superficial em suas extremidades, reduzindo seu diâmetro, pois os mesmos não passavam pela abertura da máquina, a qual possui praticamente o mesmo diâmetro dos CPs, conforme pode ser visto na Figura 25. Após a etapa de raspagem superficial, separou-se três corpos de prova cilíndricos de cada traço e os mesmos foram colocados juntos na máquina, a qual foi ligada a uma velocidade constante de 33 rpm, até completar 500 rotações. Retirou-se o material do tambor e foi analisada a perda de massa de cada um dos corpos de prova para fins de comparação entre os quatro traços distintos.

Figura 25 - Ensaio de desgaste abrasivo



Fonte: Autor (2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados obtidos dos ensaios do concreto no estado fresco e no estado endurecido, analisando e interpretando os dados quanto ao comportamento mecânico dos concretos nos mais variados esforços e com as diferentes quantidades de fibra de borracha, sempre utilizando como referência o concreto sem a adição de fibras. Foi realizado um tratamento de espúrio em todos os dados desta pesquisa, a fim de eliminar valores muito fora da média e desvio-padrão.

4.1 Concreto no estado fresco

Seguindo as diretrizes das normas NBR NM 67 (ABNT, 1998) e DNER-ME 404 (DNER, 2000), foi executado o *Slump Test* para os 4 traços do concreto. Inicialmente a relação a/c do traço referência era de 0,389, conforme foi retirado da pesquisa de Costa (2015), porém, quando foi realizado o primeiro *Slump Test* do traço referência, chegou-se ao valor de 10 mm de abatimento. Como o Manual de Pavimentos Rígidos (DNIT, 2005) informa que os valores do abatimento de concretos para pavimentos devem ser na faixa de (70 ± 10) mm, acrescentou-se água à mistura até chegar nesse valor, corrigindo posteriormente a relação a/c do concreto. A Tabela 6 apresenta os valores do abatimento para cada traço, informando também o valor final da relação a/c utilizada após sua correção.

Tabela 6 - Resultados do *Slump Test*

Traço	Abatimento	Relação a/c corrigida
TR 0,0%	65 mm	0,460
TR 0,5%	75 mm	0,460
TR 1,0%	75 mm	0,460
TR 1,5%	80 mm	0,460

Fonte: Autor (2020).

Analisando os dados apresentados, é possível verificar que todos os traços enquadram-se no que é exigido pelo DNIT, isto é, estão dentro da faixa dos 60 a 80 mm de abatimento, sendo que o ideal é 70 mm e, foi empregada a mesma relação a/c para todos os traços, pois o objetivo da pesquisa é comparar os resultados com os diferentes teores de fibra de borracha.

Observou-se também que a consistência desses concretos é muito parecida e, conforme as fibras foram acrescentadas ao, o seu abatimento foi aumentando, evidenciando-se que as fibras melhoram a trabalhabilidade até certa quantidade adicionada, pois provavelmente se fosse acrescentado acima de 1,5% de fibras ao volume total do concreto, o mesmo começaria a perder sua trabalhabilidade e não se enquadraria dentro da faixa exigida para concretos de pavimentos.

4.2 Concreto no estado endurecido

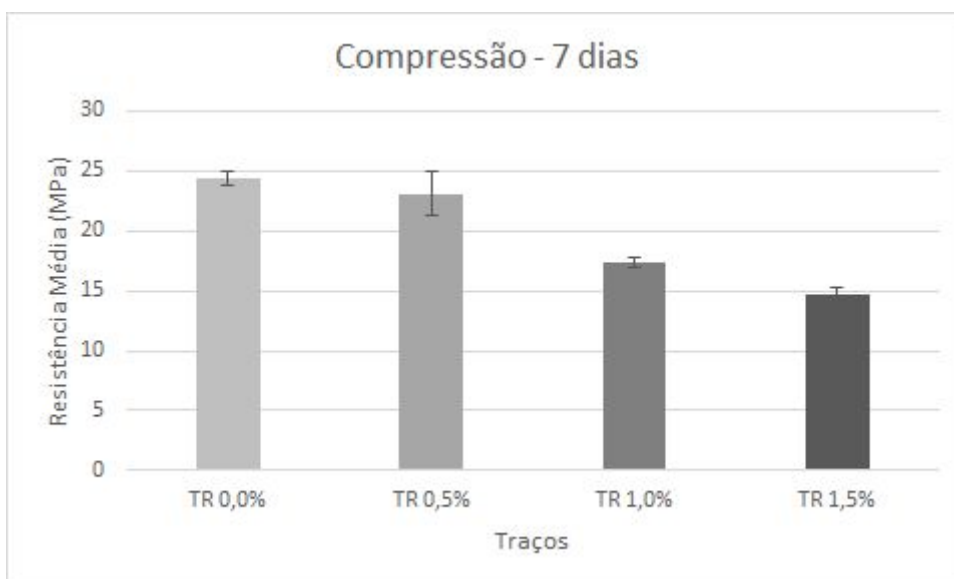
Esta seção divide-se em quatro partes, onde são apresentados os resultados de resistência à compressão, de resistência à tração por compressão diametral, de resistência à flexão e de desgaste abrasivo pelo método Los Angeles, analisando e avaliando estes resultados, os quais foram obtidos por meio de ensaios de controle tecnológico no Laboratório de Tecnologia da Construção da Univates.

4.2.1 Resistência à compressão

Para o ensaio de compressão do concreto, foram rompidos 36 corpos de prova cilíndricos, 12 em cada uma das idades especificadas, sendo 3 para cada traço com as quantidades de fibras de borracha acrescentadas, com o objetivo de compará-los com o traço referência. O Apêndice A detalha todos os valores de resistência à compressão dos corpos de prova, apresentando as médias para cada traço e também a diferença percentual dos traços com fibras comparativamente com o traço referência.

O Gráfico 5 apresenta as resistências à compressão destes concretos com a ruptura aos 7 dias após sua concretagem. Analisando o gráfico citado, observa-se que quanto mais fibras foram adicionadas ao concreto, sua resistência foi diminuindo, chegando a ter uma redução de até 39,95% no TR 1,5%. Porém, se compararmos somente os dois primeiros traços, nota-se que não há muita diferença nas resistências, pois perdeu-se somente 5,17% em comparação com o TR 0,0%.

Gráfico 5 - Resistência à compressão aos 7 dias



Fonte: Autor (2020).

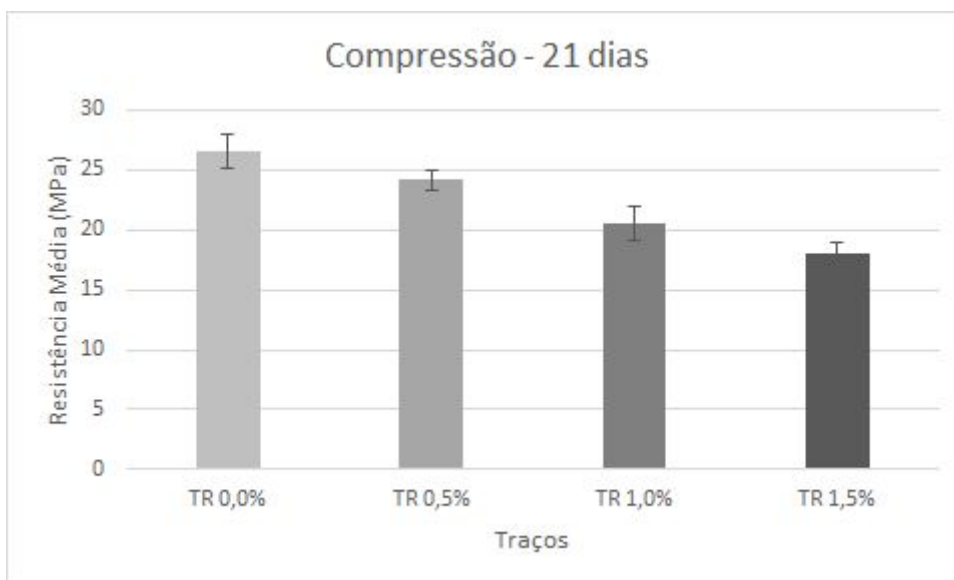
No estudo elaborado por Kurz *et al.* (2018), às quais substituíram o agregado miúdo por fibra de borracha nas proporções de 2,5%, 5%, 10% e 15%, também ficou evidenciado que quanto mais fibras foram acrescentadas, maior foi a perda de resistência à compressão aos 7 dias, entretanto, no traço com 5% de fibras substituídas, a resistência média foi 6,74% superior ao do traço com 2,5%.

Granzotto (2010) também indicou que quanto mais fibras foram acrescentadas, maior foi a perda de resistência, sendo de 28% para um concreto com 5% de fibras e chegando até o valor de 47,6% para o concreto que teve 15% de fibras adicionadas em sua composição, testemunhando assim, que as fibras de borracha auxiliam diretamente na perda de resistência à compressão do concreto na ruptura aos 7 dias.

Já no trabalho desenvolvido por Campos e Jachinto (2010), os resultados de resistência à compressão foram um pouco dispares dos citados anteriormente. Os autores averiguaram que na idade de 7 dias, houve um decréscimo de 25% de resistência para um concreto com 5% de fibras adicionadas em sua composição, porém, comparando com o concreto que possui 10% de fibras, quase não houve perda de resistência, ou seja, essa diminuição da resistência não ocorre de forma linear com o aumento da quantidade de fibras.

Quatorze dias após os primeiros corpos de prova serem rompidos, transcorreu a ruptura de mais 12, de acordo com o que é exposto no Gráfico 6. Comparando as resistências à compressão aos 7 e 21 dias, constata-se que os traços que contém maior quantidade de fibras (TR 1,0% e TR 1,5%) tiveram um crescimento significativo em suas resistências, mesmo ficando abaixo dos demais. O TR 0,5% é o que teve o menor aumento de resistência em comparação com a idade de ruptura aos 7 dias.

Gráfico 6 - Resistência à compressão aos 21 dias



Fonte: Autor (2020).

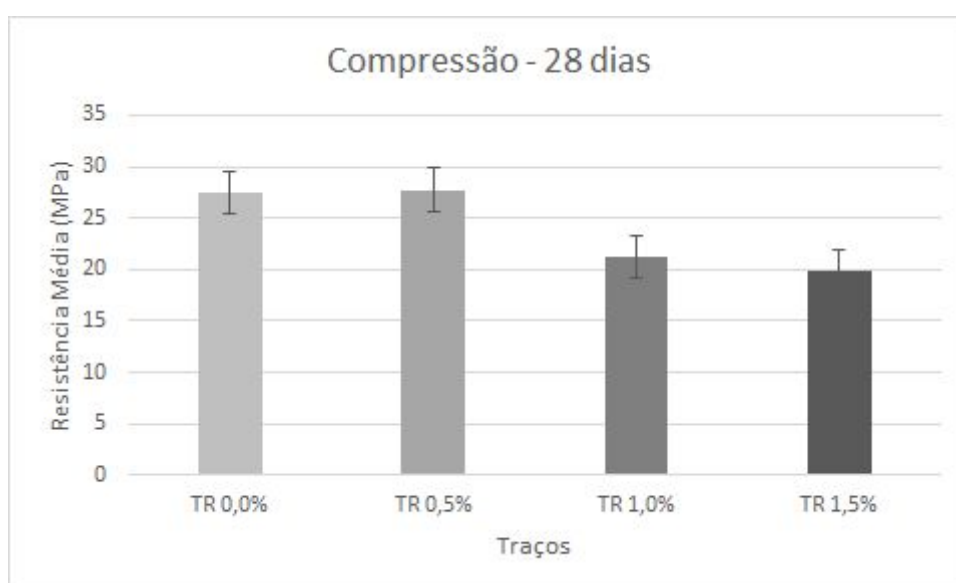
As informações citadas anteriormente refletem-se diretamente no percentual de perda de resistência dos traços com fibras, comparando as duas idades de ruptura. Enquanto o TR 0,5% passou de 5,17% para 8,93% sua perda de resistência em comparação com o traço referência, os traços TR 1,0% e TR 1,5% diminuíram de 28,67% para 22,48% e de 39,95% para 32,20%, respectivamente. Assim sendo, pode-se supor que quando mais aproxima-se do estado endurecido, menor é a diferença de resistência à compressão entre um concreto normal e um que possua fibras de borracha em sua composição.

O traço referência, que foi retirado do trabalho de Costa (2015) foi calculado para ficar na faixa dos 30 MPa, resistência característica à compressão na idade de 28 dias para concretos empregados na execução de pavimentos rígidos, conforme indica o Manual de Pavimentos Rígidos (DNIT, 2005). De acordo com o que é retratado no Gráfico 7, o valor de resistência à compressão aos 28 dias do traço referência ficou em torno dos 27,5 MPa. Devido a alteração da relação a/c do traço para se chegar ao abatimento exigido pelo DNIT, este concreto diminuiu sua resistência à compressão em torno de 2,5 MPa.

Analisando o Gráfico 7, pode-se observar que houve praticamente um empate técnico entre as resistências dos traços TR 0,0% e TR 0,5%, levando o segundo,

uma pequena vantagem de 0,84% (27,76 MPa x 27,53 MPa). Já os traços TR 1,0% e TR 1,5% continuaram com seus valores bem abaixo dos demais, com diferença de 22,95% e 28,04%, respectivamente, levando como base de comparação o traço referência. Outro ponto a ser citado, é que o traço com maior quantidade de fibras em sua composição (TR 1,5%), apesar de ter a menor resistência de todos, foi o que mais apresentou ganho de resistência ao longo do tempo, passando de 39,95% de perda de resistência aos 7 dias para 28,04% aos 28 dias.

Gráfico 7 - Resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: Autor (2020).

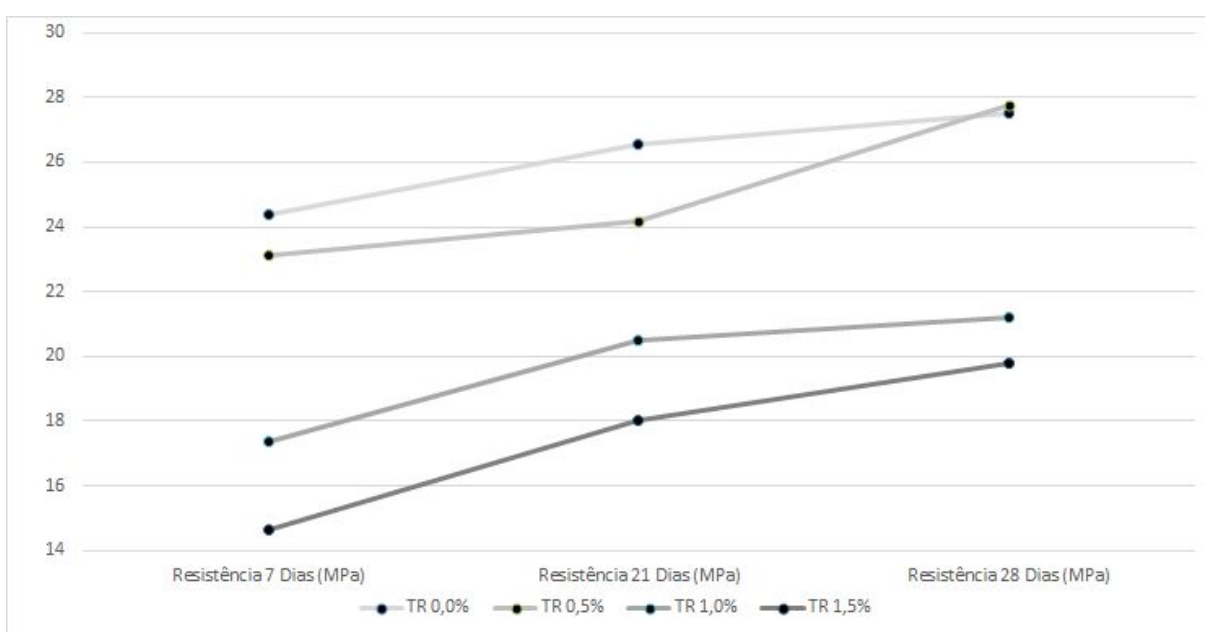
No estudo produzido por Moreira *et al.* (2014), as perdas de resistência aos 28 dias foram muito maiores que do estudo em questão, provavelmente essa diferença se dê pelo fato de que os autores acrescentaram muito mais borracha ao concreto. Num teor de 12,5% de borracha adicionada, houve perda de 50% na resistência à compressão, já com o dobro de borracha, essa resistência decaiu para 73,5% e, com 50% de borracha, chegou até o percentual de 87,5%.

O traço referência de Granzotto (2010) chegou a um valor quase idêntico de resistência à compressão se comparado ao deste trabalho, sendo de 27,8 MPa. Porém, os concretos constituídos por fibras, tiveram redução significativa em sua resistência, sendo de 12,59% para o com menor quantidade de fibras (5%) e

chegando até 45,83% para com o maior quantidade (15%). Esses valores de redução na resistência divergem-se dos resultados desta pesquisa.

Conforme pode ser visto no Gráfico 8, os dados apresentados de ganho de resistência à compressão nas três idades de ruptura seguem uma lógica de crescimento linear. Isso comprova que os valores encontrados das médias dos corpos de prova são autênticos e muito próximos da realidade. Pode-se citar como preponderante, a ultrapassagem da resistência do TR 0,5% pelo traço referência aos 28 dias.

Gráfico 8 - Ganho de resistência nas idades de ruptura



Fonte: Autor (2020).

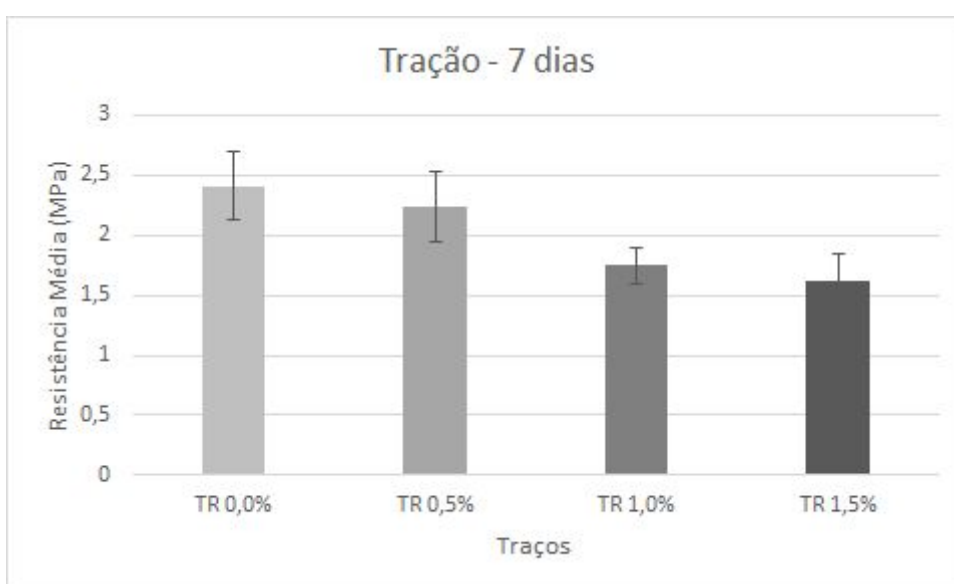
4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Da mesma forma que no ensaio de compressão, os resultados de resistência à tração por compressão diametral foram obtidos em três idades diferentes. Os corpos de prova foram rompidos aos 7, 21 e 28 dias, sendo que em cada uma das idades, rompeu-se 12 CPs, onde efetuou-se uma média dentre os 3 corpos de prova de cada traço para fins de comparação. No Apêndice B, é possível verificar todos valores alcançados de resistência à tração dos concretos produzidos, bem como

suas médias e seus percentuais de ganho ou perda de resistência em relação ao traço referência.

Observando o Gráfico 9, que expõe as resistências média dos 4 concretos distintos no rompimento aos 7 dias, constata-se que quanto mais fibras de borracha foram adicionadas ao traço, maior foi a perda de resistência do concreto. Todos os valores registrados assemelham-se bastante entre si levando em consideração cada traço, isso comprova que os resultados de resistência nessa idade são confiáveis, pois são muito próximos.

Gráfico 9 - Resistência à tração aos 7 dias



Fonte: Autor (2020).

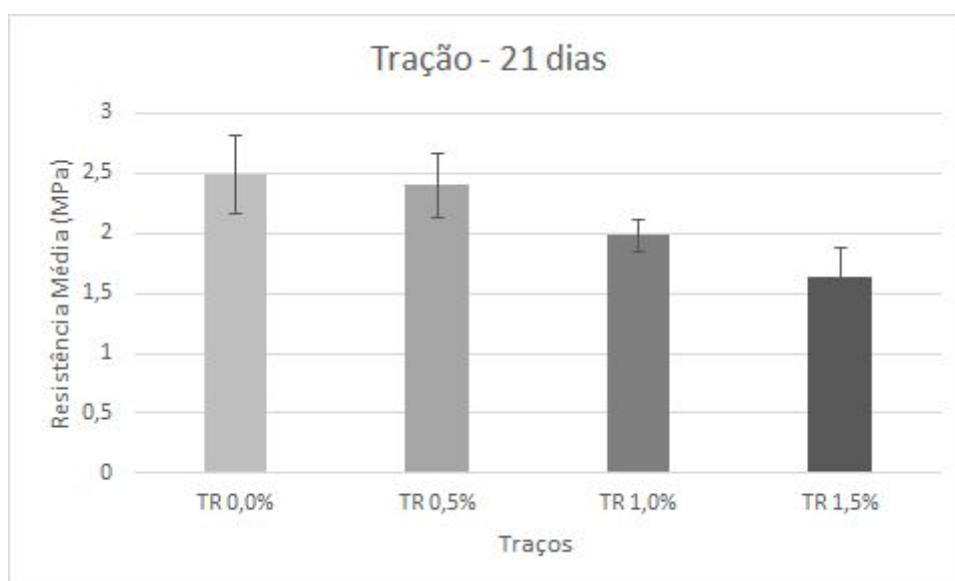
Santos (2005) elaborou sua dissertação comparando um concreto referência com outros três com quantidades de fibras de borracha de 1%, 2% e 3% incorporadas ao volume total do concreto. No ensaio de tração por compressão diametral aos 7 dias, houve redução na resistência conforme mais fibras foram adicionadas, do mesmo modo que no presente estudo. A perda de resistência à tração foi de 17,5%, 40% e de 55%, ou seja, valores bem mais elevados comparando-se com os deste estudo.

Diferentemente do trabalho citado anteriormente, Carvalho *et al.* (2018) substituíram a massa do cimento por fibra de borracha na composição do concreto,

com proporções de 1 a 5% de fibra. Além disso, utilizaram dois tipos de diâmetros destas fibras e alguns resultados alcançados foram bastante satisfatórios. Para as fibras de 4,5mm de diâmetro, ocorreu um aumento de 11,80% de resistência com 1% de fibras e de 5,20% com 2% de fibras. Já nas fibras de 2,36mm, o aumento foi de 2,43% também na proporção de 2%. Os outros resultados ficaram abaixo do traço referência, porém, com pouca diferença.

Aos 21 dias após a concretagem ter sido realizada, outros 12 corpos de prova foram rompidos para coletar-se suas resistências à tração. O Gráfico 10 expressa os dados dessas resistências, onde percebe-se que o TR 0,5% fica muito próximo do traço referência, já os traços com maior quantidade de fibras permanecem com suas resistências bem abaixo.

Gráfico 10 - Resistência à tração aos 21 dias

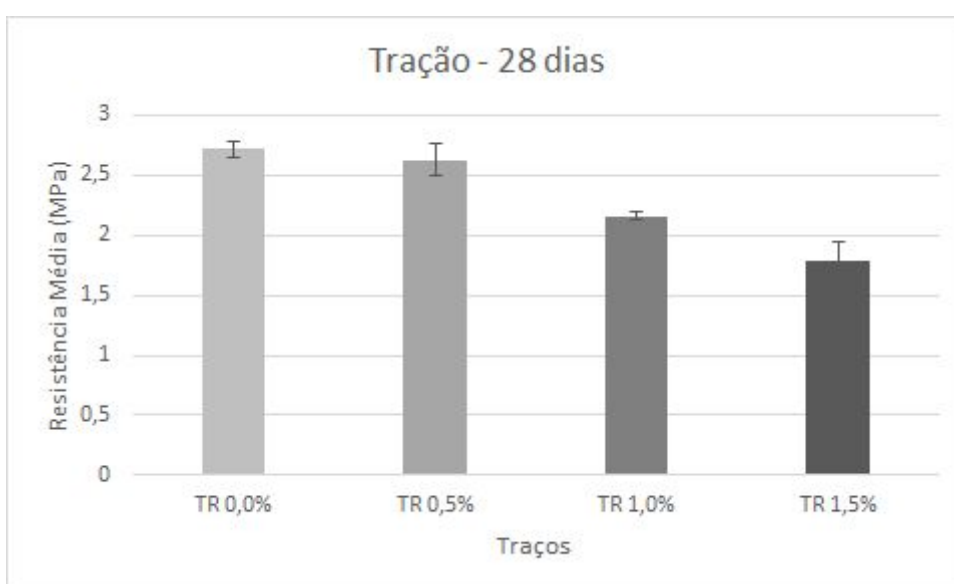


Fonte: Autor (2020).

Comparando os dados apresentados no Gráfico 9 e Gráfico 10, nota-se uma diminuição na perda de resistência do TR 0,5%, que passa de 7,05% para 3,61% e do TR 1,0%, que altera de 27,39% para 20,48%. Porém, no traço com maior quantidade de fibras em sua formação, há um pequeno aumento de pouco menos de 2%, chegando perto dos 34% de perda de resistência, se colacionado ao TR 0,0%.

Já no Gráfico 11, que mostra os resultados de resistência à tração aos 28 dias, percebe-se que o TR 0,5% diminui um pouco mais a diferença percentual para o traço referência, chegando em 3,31%, a qual pode ser considerada uma diferença insignificante. Os traços TR 1,0% e TR 1,5% praticamente não sofreram alterações em relação à diferença de resistência com o traço referência, permanecendo em torno de 20,5% e 34%, nesta ordem. Em resumo, pode-se concluir que as idades de 21 e 28 dias de cura em nada alteraram as diferenças percentuais dos traços com fibras correlacionados com o TR 0,0%.

Gráfico 11 - Resistência à tração aos 28 dias.



Fonte: Autor (2020).

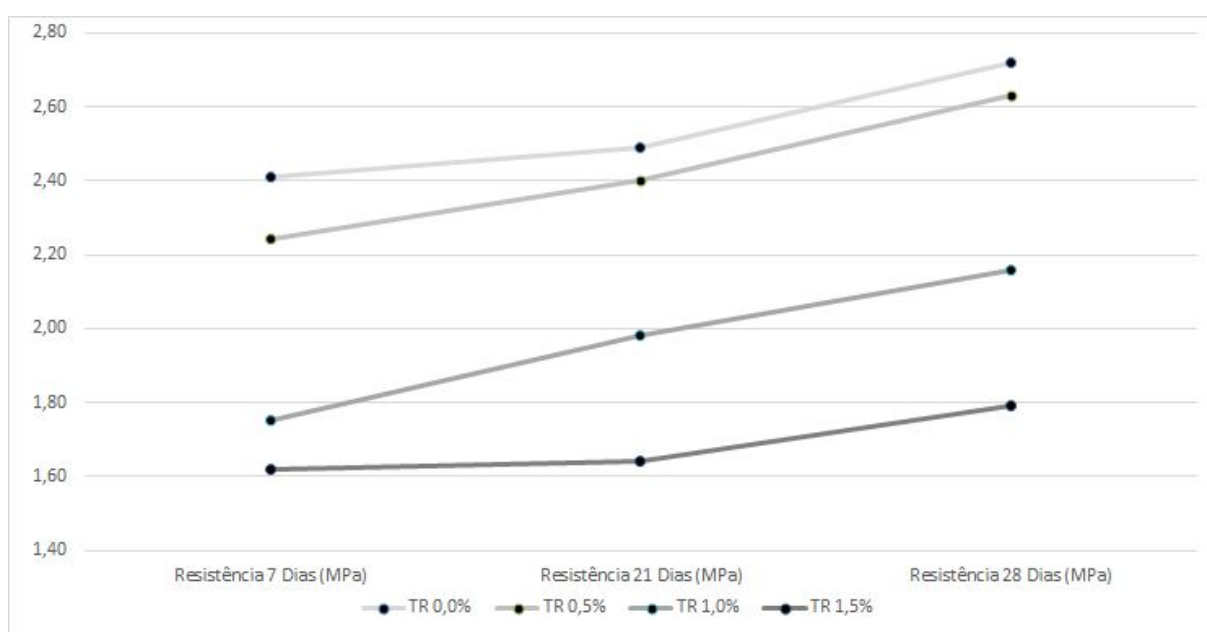
Campos e Jacintho (2010) também obtiveram resultados de resistência à tração por compressão diametral em sua pesquisa. Os autores realizaram a ruptura dos corpos de prova nas idades de 7 e 28 dias. Aos 7 dias, houve redução de 35% para um concreto com adição de 5% de fibras e de 27% para o concreto com 10% de adição. Em compensação, aos 28 dias, as perdas foram de 27% e 14%, ou seja, houve diminuição de perda de resistência enquanto o concreto entrava em seu estado endurecido.

Com a adição de 7% de fibras de borracha à massa de areia do traço, Pacheco *et al.* (2017) concluíram que a resistência à tração por compressão

diametral sofreu uma perda de 22,1% comparando-a com o traço referência. O mesmo concreto, porém, com 15% de fibras em relação à massa de areia teve uma perda maior ainda, chegando aos 41,9%. Esses valores referem-se à idade de ruptura aos 28 dias.

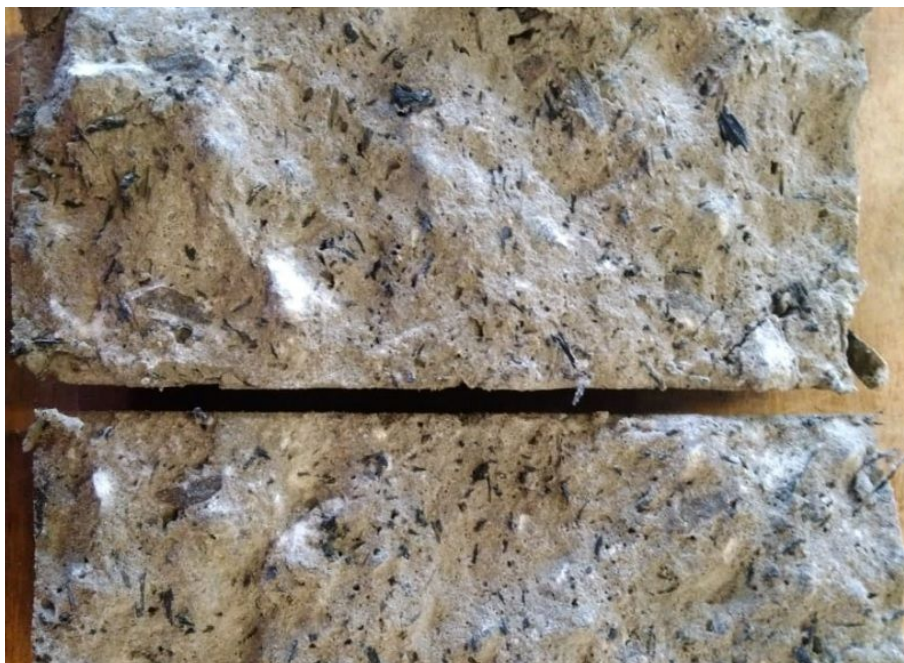
Em igualdade com os resultados de resistência à compressão, os de tração por compressão diametral também seguem uma lógica de crescimento linear em suas resistências ao longo do tempo, conforme é visto no Gráfico 12. Os traços TR 0,0% e TR 0,5% ficam muito próximos nas três idades de ruptura, tendo uma leve vantagem para o traço referência. Os outros dois, bem abaixo dos demais, quase não sofrem alterações de diferença percentual ao longo do tempo. Já na Figura 26, percebe-se que as fibras de borracha distribuem-se de forma bastante homogênea na matriz cimentícia do concreto, não ficando localizadas somente a um ponto em comum.

Gráfico 12 - Ganho de resistência nas idades de ruptura



Fonte: Autor (2020).

Figura 26 - Distribuição das fibras no concreto



Fonte: Autor (2020).

4.2.3 Flexão a 4 pontos

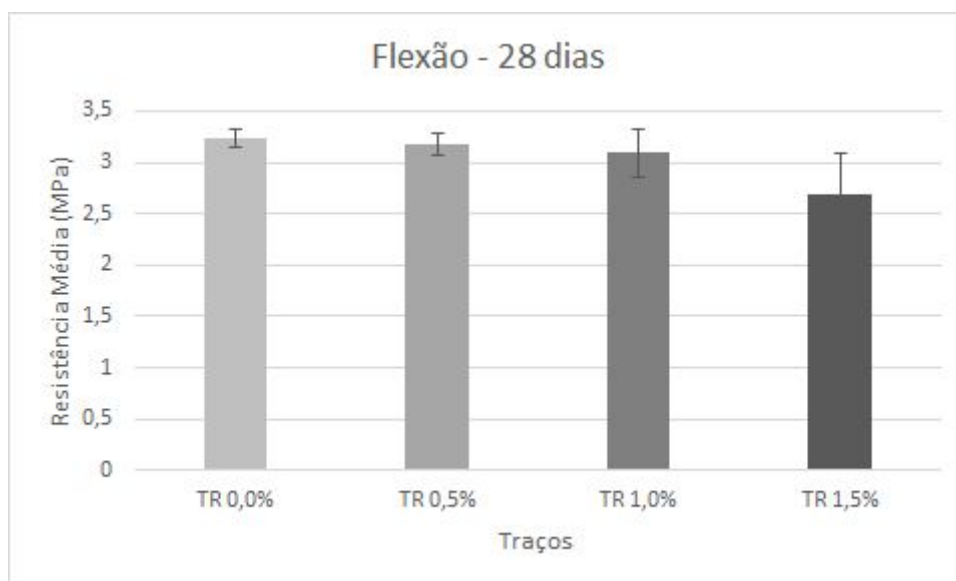
Os resultados do ensaio de flexão a 4 pontos, também conhecido como tração na flexão, foram obtidos na idade de ruptura aos 28 dias. Na totalidade, foram rompidos 12 corpos de prova nesta data, sendo três para cada um dos traços, onde foi efetuada uma média para comparar os traços com fibras de borracha ao traço referência. O Apêndice C exhibe todos os dados atingidos neste ensaio, bem como as diferenças percentuais de perda de resistência para cada traço.

Segundo o Manual de Pavimentos Rígidos (DNIT, 2005), um concreto específico para esse tipo de pavimento deve ter sua resistência à tração na flexão em torno dos 4,5 MPa. No presente estudo, esse valor ficou um pouco abaixo do que é exigido em norma (3,24 MPa), pois foi alterada a relação a/c do concreto para se chegar aos valores de abatimento determinados pela mesma norma.

Avaliando o Gráfico 13, que apresenta as médias das resistências à flexão dos concretos, percebe-se uma pequena perda de resistência quando as fibras de borracha são adicionadas ao concreto, exceto no TR 1,5%, onde a resistência sofre uma diminuição considerável. Contrapondo o traço referência aos demais,

verifica-se uma redução de 2,16% e 4,63% para os traços TR 0,5% e TR 1,0%, respectivamente. Assim sendo, apesar de haver redução, os dados indicam que as diferenças nos valores são mínimas e não significativas. Enquanto isso, no TR 1,5%, o percentual de perda ficou na casa dos 17%.

Gráfico 13 - Resistência à flexão aos 28 dias



Fonte: Autor (2020).

Contrastando os resultados obtidos na presente pesquisa com o trabalho produzido por Carvalho *et al.* (2018), percebeu-se algumas características bem parecidas. As diferenças das resistências alcançadas pelos autores assemelham-se bastante entre si, porém, um dos concretos com fibras teve um leve aumento de sua resistência se comparado ao do concreto sem fibras. Para os traços com fibras de 2,36 mm de diâmetro, às quais são bem próximas das utilizadas neste trabalho, houve redução de 2,41% (1% de fibras), 1,34% (3% de fibras), 1,61% (4% de fibras) e 7,25% (5% de fibras), em compensação, no concreto com 2% de fibras acrescentadas, houve um aumento de 1,07% na resistência.

Giacobbe (2008) também identificou em sua pesquisa que com a adição de fibras de borracha no concreto, ocorreu a perda gradativa de resistência à flexão. Os teores empregados pela autora foram de 7,5% e 15% e as perdas de resistência chegaram em torno dos 16% e 30%, respectivamente. Provavelmente esses valores

sejam mais elevados que os encontrados nos demais estudos pelo alto teor de borracha empregada na produção dos concretos.

Apesar de ter ocorrido uma pequena diminuição da resistência à flexão nos concretos com fibras, observou-se no momento em que os corpos de prova foram rompidos que a borracha atuou como uma fibra, evitando uma ruptura total do CP. Em outras palavras, os concretos com fibras resistiram à cargas residuais mesmo após sua fratura, obtendo uma ruptura menos frágil que do traço referência, conforme pode ser observado na Figura 27. Cabe citar também que em nenhum dos 12 corpos de prova ensaiados ocorreu a ruptura fora do terço central, ou seja, todos enquadram-se dentro da norma vigente para esse tipo de ensaio.

Figura 27 - Ruptura dos CPs sem e com fibras



Fonte: Autor (2020).

Freitas (2007) obteve as mesmas conclusões, pois em sua pesquisa, as rupturas transcorreram da mesma forma, onde a maior fissura apareceu no concreto sem fibras em sua composição, em contrapartida, nos concretos com fibras de borracha, as duas faces permaneceram interligadas após a ruptura. Já Toutanji

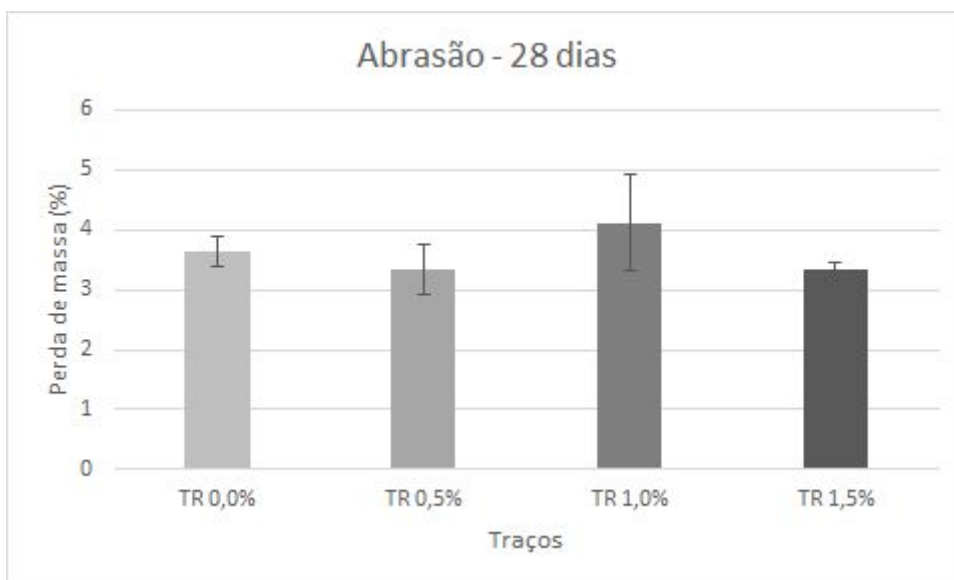
(1996) atribui o menor surgimento de fissuras aos concretos com fibras de borracha devido ao baixo módulo de elasticidade deste material, onde a borracha se deforma absorvendo uma parte da carga aplicada após a ruptura.

4.2.4 Desgaste abrasivo pelo método de abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão foi executado 28 dias após a concretagem dos corpos de prova. Neste ensaio, os três CPs de cada traço foram inseridos juntamente na máquina conhecida como moinho de bolas, visto que o LATEC não possui a máquina Los Angeles em suas dependências. O equipamento foi programado para executar 500 rotações, sendo 33 por minuto, conforme indicam as normas DNIT-ME (DNIT, 2018) e NBR NM 51 (ABNT, 2000). O Apêndice D detalha todos os dados adquiridos, apresentando as massas antes e depois da realização do ensaio, bem como a perda de material em gramas e em porcentagem de todos os corpos de prova.

O Gráfico 14 expõe as médias em porcentagem da perda de massa pelo impacto dos corpos de prova para cada um dos quatro traços. Considerando o TR 0,0% como o traço referência para as análises, apenas um dos traços com fibras de borracha obteve uma perda maior de massa, sendo ele o TR 1,0%, o qual alcançou 4,12% de redução, enquanto o traço referência reduziu 3,64% da sua massa inicial. Entretanto, os traços TR 0,5% e TR 1,5% atingiram valores praticamente idênticos, sendo eles de 3,33% e 3,34%, respectivamente. Se comparados ao traço referência, afirma-se que o mesmo perdeu em torno de 8,5% a mais de material que os traços com fibras.

Gráfico 14 - Perda de massa por abrasão



Fonte: Autor (2020).

No trabalho desenvolvido por Costa (2015), a qual utilizou a máquina Los Angeles para a execução do ensaio de abrasão, foram analisados 4 traços distintos, sendo dois deles de concretos convencionais e outros dois reforçados com fibras. Assim como nesta pesquisa, os resultados foram favoráveis aos concretos com fibras em sua composição. Enquanto os concretos convencionais obtiveram perda de 35% e 10% de massa, os reforçados com fibras tiveram um decréscimo de apenas 5% da sua massa inicial.

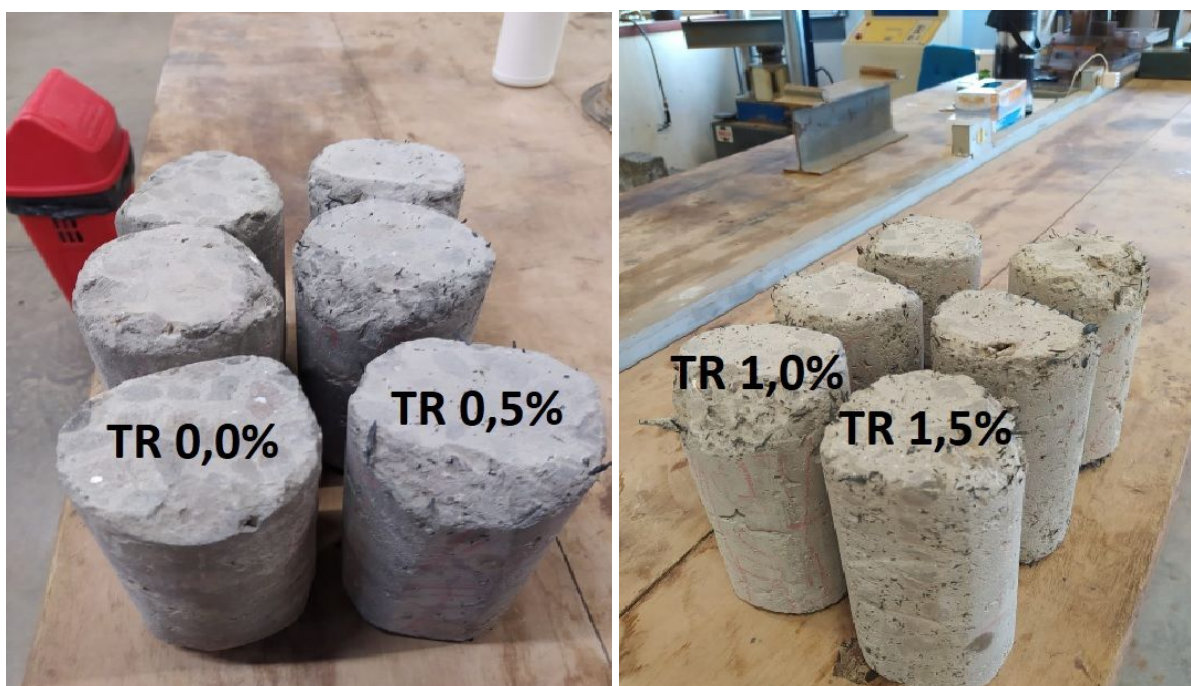
As resistências à abrasão no estudo elaborado por Freitas (2007) foram obtidas através do método submerso. Apesar da metodologia do ensaio ser diferente das demais citadas anteriormente, seus resultados alcançados convergem com eles. Para análise dos resultados, produziu-se quatro traços, um referência sem fibras de borracha e outros três com 5%, 10% e 15% em proporção. Os melhores resultados, que geraram menos perda de material, foram os que possuem mais fibras de borracha em sua composição, enquanto que o traço sem fibras foi o que obteve a maior perda de massa após o ensaio ter sido finalizado.

Em contrapartida dos trabalhos citados anteriormente, na pesquisa produzida por Marques (2005), o concreto que teve adição de borracha vulcanizada de 10% em sua composição obteve maior perda de massa no ensaio de abrasão que o

concreto referência. Os valores alcançados foram de 12,5% e 11,9%, ou seja, uma pequena diferença de 0,6% entre eles.

Nenhum dos 12 corpos de prova que foram inseridos na máquina sofreram ruptura parcial ou total. Analisando a Figura 28, é possível verificar que eles também não possuem fissuras em sua composição e, a maior perda de massa por abrasão ocorre nos vértices superiores e inferiores. Algumas dessas características podem ser relacionadas ao tipo de máquina utilizada neste ensaio, pois por ela possuir um diâmetro menor que a máquina Los Angeles, o espaço para que ocorram os impactos entre os CPs diminui, e consequentemente há menos perda de material.

Figura 28 - Corpos de prova após o ensaio de abrasão



Fonte: Autor (2020).

5 CONCLUSÃO

A sustentabilidade é um conceito que vem evoluindo bastante ao longo dos últimos anos em vários segmentos e a construção civil compactua diretamente com essa ideologia. Cada vez mais, os profissionais da área buscam alternativas para minimizar ou controlar danos provenientes do consumo excessivo de matéria prima e pelo elevado volume de resíduos gerados. Por conseguinte, essa pesquisa tratou do reaproveitamento do resíduo de borracha de pneus em formatos fibrosos, para a aplicação em um concreto específico para pavimentos rígidos, avaliando se o material pode vir a contribuir para a durabilidade destes pavimentos, dentre outros aspectos.

Pôde-se notar nesta pesquisa uma certa dificuldade por parte do acadêmico de encontrar empresas na região do Vale do Taquari que dispusessem desse tipo de material, as borrachas de pneus transformadas em fibras pelo processo de recauchutagem. Além disso, se levarmos em consideração para o âmbito estadual e nacional, percebe-se que há poucas empresas que reaproveitam esse material, sendo que se for descartado em aterros sanitários ou incinerados, haverá um desperdício de matéria prima indevidamente.

Em relação às propriedades físicas dos concretos no estado fresco por meio do ensaio de *Slump Test*, constatou-se que a consistência dos 4 traços é bem parecida, visto que houve uma diferença de somente 15 mm de abatimento entre os extremos (TR 0,0% e TR 1,5%), e lembrando que foi utilizada a mesma relação a/c para todos os traços. Conforme foi acrescentando-se as fibras de borracha ao concreto, o abatimento do mesmo foi aumentando, porém, nos quatro casos, os

concretos enquadraram-se no que é exigido em norma. Desta forma, entende-se que as fibras melhoram a trabalhabilidade do concreto até certo ponto, pois provavelmente se fosse acrescentado 2% ou mais de fibras ao volume total do concreto, ele começaria a perder sua trabalhabilidade e diminuir consideravelmente sua consistência. Cabe ressaltar também que os 4 traços obtiveram uma boa plasticidade no momento em que foram adensados nos corpos de prova.

A resistência à compressão do traço referência aos 28 dias ficou um pouco abaixo do projetado inicialmente, em torno de 2,5 MPa. Isso porque a relação a/c do traço original foi alterada para chegar-se aos valores de abatimento exigidos nas normas vigentes. Porém, levando-se em consideração para a análise o desvio padrão desse traço, a resistência média fica muito próxima dos 30 MPa, valor característico para concretos de pavimentos.

Em relação aos traços com a inserção de fibras de borracha, os concretos com 1,0% e 1,5% tiveram queda acentuada em suas resistências à compressão, mantendo-se acima da faixa dos 20% em todas as idades de ruptura. Em compensação, o traço TR 0,5% obteve nas três idades de ruptura resistências à compressão sempre próximas do traço referência, ultrapassando-o na idade de 28 dias. Apesar da diferença nas resistências ser pouco relevante, se utilizarmos o desvio padrão para fins de comparação, há um aumento na diferença entre os dois traços, tendo o traço com fibras em sua composição uma vantagem sobre o traço sem fibras. Contrapondo os dados dessa pesquisa com a literatura em geral, pode-se afirmar que os resultados encontrados pelo autor são satisfatórios, visto que em quase todas as pesquisas correlacionadas ao tema, as resistências à compressão dos concretos dispuseram de um alto percentual de perda conforme as fibras de borracha foram acrescidas ao concreto, o que não é observado no traço TR 0,5%.

No ensaio de tração por compressão diametral, os resultados alcançados comparando as resistências dos traços com fibras de borracha ao traço referência possuem uma grande semelhança aos resultados atingidos no ensaio de compressão. Enquanto os traços com maior quantidade de fibras em sua constituição (TR 1,0% e 1,5%) permaneceram com suas resistências nas faixas de 20% e 30% menores que o TR 0,0% nas três idades de ruptura, respectivamente, o

traço TR 0,5% manteve seus valores bem próximos do traço referência. Aos 28 dias, a variação entre eles foi de 3,31%, no entanto, considerando o desvio padrão de ambos, há um empate técnico em suas resistências, alcançado o valor de 2,80 MPa. Assim sendo, pode-se inferir que as fibras de borracha em uma pequena quantidade, quando acrescidas a um concreto para pavimentos rígidos, não ocasionam perda de resistência à tração, característica que não é observada na maioria dos trabalhos relacionados a esse assunto.

Os resultados obtidos no ensaio de flexão a 4 pontos assemelham-se bastante entre si. Somente o traço TR 1,5% ficou com sua resistência bem distinta das demais, com redução de quase 17% em comparação com o traço referência. Em contrapartida, os traços TR 0,5% e TR 1,0% diminuíram em torno de 2% e 4,5% suas resistências, respectivamente. Considerando o desvio padrão para fins de conferência, esses percentuais diminuem ainda mais, alcançando um empate técnico entre o traço sem fibras e os traços com fibras de borracha. Contudo, a característica apontada como mais importante pelo autor é a forma como os corpos de prova sofreram sua ruptura. Conforme foi analisado no momento de rompimento, no concreto sem adição de fibras o corpo de prova teve sua ruptura total no terço central, enquanto os concretos com fibras de borracha alcançaram uma ruptura parcial, podendo até considerar-se como uma trinca na vertical, também no terço central dos CPs. Essa situação é interessante, pois evidencia que as fibras atuam no concreto com a mesma elasticidade da borracha, uma vez que essa característica pode ser empregada para auxiliar o concreto na absorção de impactos causados por veículos mais pesados ou até mesmo impedir que ocorram fissuras oriundas de variação térmica, até porque a borracha não é um material condutor de energia térmica.

O traço TR 1,0% diverge dos demais quando analisamos a perda de material pela resistência à abrasão. Não foi identificado pelo autor o motivo para esse traço ficar tão acima dos outros em relação à perda material, na medida em que a borracha é um material com uma grande resistência à abrasão, de acordo com o que é apresentado pela literatura. Em compensação, o traço com a maior quantidade de borracha em sua composição (TR 1,5%) foi o que obteve os melhores resultados de resistência à abrasão, se considerarmos o desvio padrão para a

análise final. Em seguida, aparece o traço TR 0,5%, o qual também obteve bons resultados de resistência à abrasão, acima do traço referência. Cabe a ressalva, conforme citado anteriormente nessa pesquisa, que pelo fato de ter utilizado-se uma máquina com um diâmetro menor em relação à máquina Los Angeles, os resultados podem não ser tão confiáveis, porém, por lógica, todos os quatro traços passaram pela mesma máquina e pelo mesmo processo, então pode-se concluir que para fins de confrontação, os valores alcançados são genuínos.

Em uma análise geral, comparando os 4 traços produzidos, as propriedades deles no estado fresco e suas resistências mecânicas no estado endurecido, conclui-se que as fibras de borracha adicionadas em uma pequena quantidade apresentam vantagens para a aplicação em concretos para pavimentos. O traço 0,5% foi o que obteve os resultados mais satisfatórios, melhorando as características e resistências do concreto aos esforços de compressão, de flexão, de abrasão e, mantendo-se equivalente ao esforço de tração. Em compensação, os traços TR 1,0% e TR 1,5% em uma média geral, obtiveram uma alta perda de resistência se comparados ao traço referência.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Daniel Pedroso de. **Solução do projeto de pavimento rígido**. Estudo de caso: corredor de ônibus do binário das Ruas Dr. João Colin e Blumenau. Joinville: UFSC, 2015. Acesso em: 11 de set. 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Manual of concrete practice: part 5**. ACI. Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete. Detroit: ACI Committee 544, 1996. Acesso em: 24 de set. 2019.

ANANIAS, Renata; OLIVEIRA, Viviane; MEAN, Angélica. **Pavimentação rígida**. Itatiba-SP: Universidade São Francisco, 2011. Acesso em: 09 de set. 2019.

ARAÚJO, Marcelo Almeida; SANTOS, Martha Jussara Paixão dos; PINHEIRO, Heunbner Pereira; CRUZ, Zoraide Vieira. **Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação - Pavimento rígido (concreto) x flexível (asfalto)**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento: volume 10, 2016. Acesso em: 09 de set. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Relatório anual das rodovias**. <<http://www.antt.gov.br/>>. Acesso em: 11 de set. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-1**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-2**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 2 - Ensaio de desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 51**: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1:** Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9479:** Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:** Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 33:** Concreto - Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142:** Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222:** Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680-1**: Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680-2**: Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 2: Resistência à tração na flexão. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

BATAYNEH, Malek K.; MARIE, Iqbal; ASI, Ibrahim. **Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries**. Oxford: Waste Management, 2008. Acesso em: 28 de set. 2019.

BENTUR, A; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. Londres e Nova York: Modern Concrete Technology Series 2 ed, 2007. Acesso em: 23 de set. 2019.

BERNARDI, Stefania Tesi. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. Acesso em: 03 de set. 2019.

BERNUCCI, Liedi Bariani; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; MOTTA, Laura Maria Goretti da; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 2006. Acesso em: 09 de set. 2019.

BIROLI, Fernanda Cristina. **Comparação dos custos de pavimentos flexíveis e rígidos com base em conceitos de gerência de pavimentos**. São Carlos: USP, 2003. Acesso em: 15 de set. 2019.

BRAZ, Mariane Caroline de Araujo; NASCIMENTO, Felipe Bomfim Cavalcante do. **Concreto reforçado com fibras de aço**. Maceió: UNIT, 2015. Acesso em: 23 de set. 2019.

BRINO, Ricardo. **Fibra de borracha, notas de estudo de Engenharia Têxtil**. Fortaleza: UECE, 2010. Acesso em: 03 de out. 2019.

CÉSAR, S. A. B. M.; MOSCA, A. M. A.; LINTZ, R. C. C.; CARNIO, M. A. **Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de borracha de pneu**. Rio de Janeiro: 48º Congresso Brasileiro do Concreto, 2006. Acesso em: 25 de set. 2019.

CAMPOS, Wenderson Cássio de; JACHINTO, Ana Elisabete. **Concreto com adição de fibras de borracha: um estudo frente às resistências mecânicas**. Campinas: PUC-Camp, 2010. Acesso em: 25 de set. 2019.

CARVALHO, Alina S.; BARBOSA, Anderson H.; GRANJA, Jailma M. M.; FERRAZ, Ricardo F.; SILVA, Rita de Cássia L. e. **Concreto com fibras de borracha reciclada de pneus**. Juazeiro: Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2018. Acesso em: 25 de set. de 2019.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA 258**. Brasília, 1999.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA 301**. Brasília, 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA 416**. Brasília, 2009.

COSTA, Fernanda Bianchi Pereira da. **Análise da Durabilidade de Compósitos Cimentícios de Elevada Capacidade de Deformação Reforçados com Fibras**. Porto Alegre: UFRGS, 2015. Acesso em: 17 de mar. 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035**: Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro: DNER, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 404**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: DNER, 2000.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME**: Agregados - Determinação da abrasão “Los Angeles” - Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT**: Manual de pavimentos rígidos. Rio de Janeiro: DNIT, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136-ME**: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 049-ES**: Pavimento rígido - Execução de pavimento rígido com equipamento de fôrma deslizantes - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2013.

FEIO, Maria Inês Afonso. **Avaliação da viabilidade ambiental do processo de reciclagem criogénica e da recauchutagem de pneus usados**. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2013. Acesso em: 28 de set. 2019.

FESTUGATO, Lucas. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices aspecto**. Porto Alegre: UFRGS, 2008. Acesso em: 03 de set. 2019.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto com fibras de aço**. São Paulo: USP, 2000. Acesso em: 02 de set. 2019.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto reforçado com fibras**. São Paulo: USP, 2011. Acesso em: 31 de agos. 2019.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Parâmetros de Controle e Dosagem do Concreto Projetado com Fibras de aço**. São Paulo: USP, 1997. Acesso em: 21 de set. 2019.

FREITAS, Camila. **Estudo do comportamento mecânico de concreto com adição de partículas de borracha para aplicação como material de reparo em superfícies hidráulicas**. Curitiba: UFP, 2007. Acesso em: 09 de jun. 2020.

FREITAS, Rodrigo Bezerra de; CARVALHO, Mailson Castelhão de. **Pavimento de Concreto e seus Benefícios em Rodovias: Uma Revisão Bibliográfica**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento: volume 02, 2018. Acesso em 09 de set. 2019.

GARCEZ, Estela Oliari. **Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto**. Porto Alegre: UFRGS, 2005. Acesso em: 02 de set. 2019.

GARRICK, G. M. **Analysis and testing of waste tire fiber modified concrete**. Louisiana: Universidade Estadual de Louisiana, 2005. Acesso em: 28 de set. 2019.

GIACOBBE, Silvia. **Estudo do comportamento físico-mecânico do concreto de cimento Portland com adição de borrachas de pneus**. São Paulo: USP, 2008. Acesso em: 29 de set. 2019.

GRANZOTTO, Laura. **Concreto com adições de borracha: Uma alternativa ecologicamente viável**. Maringá: UEM, 2010. Acesso em: 02 de jun. 2020.

HERNANDÉZ-OLIVARES, F.; BARLUENGA, G.; BOLATTI, M.; WITOSZEK, B. **Static and dynamic behavior of recycled tyre rubber-filled concrete**. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2002. Acesso em: 29 de set. 2019.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005.

JACINTHO, A. E. P. G. A.; PIMENTEL, L. L.; LINTZ, R. C. C.; AUN, R. J.; GODOY, J. L. **Estudo das características mecânicas e de durabilidade do concreto com**

borracha. Maceió: 54º Congresso Brasileiro do Concreto, 2012. Acesso em: 25 de set. 2019.

KUMAR, R; GOEL, P; MATHUR, R. **Suitability of Concrete Reinforced with Synthetic Fiber for the Construction of Pavements.** Japão: Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 2013. Acesso em: 20 de set. 2019.

KURZ, Mônica Navarini; BRANDELLI, Tais Marini; PALIGA, Charlei Marcelo; TORRES, Ariela da Silva. **A potencialidade do uso de resíduo de borracha de pneu em argamassa:** análise das propriedades físicas e mecânicas. Revista Matéria vol. 23 nº 03. Pelotas: UFPel, 2018. Acesso em: 29 de set. 2019.

LORENZETTI, Uaçai Vaz. **Avaliação de características associadas à durabilidade de concretos em função da cura, da dosagem e do tipo de cimento.** Florianópolis: UFSC, 2002. Acesso em: 07 de set. 2019.

MARQUES, Ana Carolina. **Estudo da influência da adição de borracha vulcanizada em concreto à temperatura ambiente e elevada temperatura.** Ilha Solteira: UNESP, 2005. Acesso em: 10 de jun. 2020.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Pavimentação.** Juiz de Fora: UFJF, 2006. Acesso em: 15 de set. 2019.

MEDEIROS, Arthur. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras.** Rio de Janeiro: PUC, 2012. Acesso em: 31 de agos. 2019.

MEHTA, Paulo Kumas; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto:** microestrutura, propriedade e materiais. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2008. Acesso em: 31 de agos. 2019.

MESQUITA, José Carlos Lobato. **Pavimento rígido como alternativa econômica para pavimentação rodoviária.** Estudo de caso - rodovia BR-262, miranda - morro do azeite - MS. Florianópolis: UFSC, 2001. Acesso em: 11 de set. 2019.

MOREIRA, José Franklin; FIDELIS, Vanessa Rosa Pereira; DIAS, João Fernando. **Concreto com borracha de pneus aplicado em ciclovias.** Uberlândia: UFU, 2014. Acesso em: 07 de jun. 2020.

MOSCATELLI, Ivo. **Fibras de aço em concreto de cimento Portland aplicados a pavimento.** Campinas: Unicamp, 2011. Acesso em: 24 de set. 2019.

MOSCHETTI, Marcelo. **Navegando em um oceano infinito:** a física geométrica de Galileu e o problema do contínuo. Campinas: Unicamp, 2011. Acesso em: 15 de set. 2019.

OLIVEIRA, Patrícia Lizi de. **Projeto estrutural de pavimentos rodoviários e de pisos industriais de concreto.** São Carlos: USP, 2000. Acesso em: 15 de set. 2019.

PACHECO, César Augusto; CAVALCANTI, Rebeca Danielle Maciel; ANDRADE, Gustavo; LAURSEN, Anderson. **Análise do concreto com adição de fibra de borracha de pneu**. Congresso Brasileiro do Concreto, 59ª ed. Bento Gonçalves: IBRACON, 2017. Acesso em: 07 de jun. 2020.

PADRON, Isabel; ZOLLO, Ronald F. **Effect of synthetic fibers on volume stability and cracking of Portland Cement Concrete and Mortar**. Journal of materials: American Concrete Institute, 1990. Acesso em: 16 de set. 2019.+65

PASA, Vanessa Fátima. **Análise do Comportamento de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras de Aço via Método dos Elementos Finitos**. Porto Alegre: UFRGS, 2007. Acesso em: 02 de set. 2019.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. **Relatório sobre a Lacuna de Emissões 2015**.

<<http://uneplive.unep.org/theme/index/13#nonstateactions>> Acesso em: 20 out. 2019.

PEREIRA, Adriana Maria; FAZZAN, João Victor; FREITAS, Verônica de. **Análise da viabilidade do uso da fibra de borracha de pneu como reforço em tijolo de solo cimento**. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades volume 3. Presidente Epitácio: IFSP, 2015. Acesso em: 28 de set. 2019.

QUININO, Uziel Cavalcanti de Medeiros. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. Porto Alegre: UFRGS, 2015. Acesso em: 03 de set. 2019.

RODRIGUES, Públio Penna Firme; MONTARDO, Julio Portella Montardo. **A Influência da Adição de Fibras de Polipropileno nas Propriedades dos Concretos para Pisos e Pavimentos**. Belo Horizonte: IBRACON, 2022. Acesso em: 16 de set. 2019.

RODRIGUES, Públio Penna Firme. **Pavimentos Estruturalmente Armados para Aeroportos**. São Paulo: IBTS, 2004. Acesso em: 11 de set. de 2019.

ROSA FILHO, Cícero de D.; COSTA E SILVA, Angelo J.; PARISI, Suellem A.; MONTEIRO, Eliana C. B.; ALMEIDA, Dayvson C. B.; **Análise do comportamento mecânico do concreto com adição de fibras de polipropileno e sua atuação no combate às manifestações patológicas**. Recife: UPE, 2017. Acesso em: 20 de set. 2019.

SAAD, Davi Pedro; SERRA, Gabriel Cabral; BARBOSA, Isa Lorena Silva; ADORNO, Ana Lúcia Carrijo. **Utilização de fibra de borracha de pneu como agregado na composição de concreto**. Revista Gestão, Inovação e Negócios, nº 1, volume 3. Anápolis: Centro Universitário de Anápolis, 2017. Acesso em: 01 de out. 2019.

SANTOS, Antonio Carlos dos. **Avaliação do comportamento do concreto com adição de borracha obtida a partir da reciclagem de pneus com aplicação em placas pré-moldadas**. Maceió: UFAL, 2005. Acesso em: 03 de out. 2019.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação**. Volume 1 / 2. ed. ampl. São Paulo: Pini, 2007.

SILVA, C. **Recauchutagem em Portugal**. Lisboa: InfoValorpneu, 2007. Acesso em: 01 de out. 2019.

SILVA, José Eudes Marinho da; CARNEIRO, Luiz Antonio Vieira. **Pavimentos de concreto: histórico, tipos e modelo de fadiga**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2014. Acesso em: 01 de set. 2019.

SILVA, Juliano Rodrigues da. **Estudo experimental de pavimentos de concreto: influência da posição da barra de transferência e do tipo de concreto**. Goiânia: UFG, 2010.

SPECHT, Luciano Pivoto. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação**. Porto Alegre: UFRGS, 2000. Acesso em: 02 de set. 2019.

SUKONTASUKKUL, P.; CHAIKAEW, C. **Concrete Pedestrian Block Containing Crumb Rubber from Recycled Tires**. Tailândia: Thamassalnt University, 2005. Acesso em: 29 de set. 2019.

TANESI, Jussara; FIGUEIREDO, Antonio Domingues. **Fissuração por retração em concretos reforçados com fibras de polipropileno (CRFP)**. São Paulo: USP, 1999. Acesso em: 17 de set. 2019.

TOUTANJI, H. A. **Cement and Concrete Composites**. The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates. Porto Rico: University of Puerto Rico, 1996. Acesso em: 09 de jun. 2020.

APÊNDICE A - Resultados do ensaio de resistência à compressão

Corpo de Prova	Idade	TR 0,0%	TR 0,5%	TR 1,0%	TR 1,5%	Unid
A	7	24,88	24,38	17,87	15,00	MPa
B	7	24,48	21,86	17,28	14,97	MPa
C	7	23,78	18,64	17,03	13,96	MPa
Média		24,38	23,12	17,39	14,64	MPa
Média percentual		0	- 5,17	- 28,67	- 39,95	%

Corpo de Prova	Idade	TR 0,0%	TR 0,5%	TR 1,0%	TR 1,5%	Unid
A	21	27,97	24,74	22,07	18,53	MPa
B	21	26,62	24,60	20,14	17,88	MPa
C	21	25,07	23,19	19,30	17,58	MPa
Média		26,55	24,18	20,50	18,00	MPa
Média percentual		0	- 8,93	- 22,48	- 32,20	%

Corpo de Prova	Idade	TR 0,0%	TR 0,5%	TR 1,0%	TR 1,5%	Unid
A	28	28,06	28,48	21,73	20,46	MPa
B	28	26,99	28,46	21,04	19,15	MPa
C	28	22,84	26,33	20,86	16,21	MPa
Média		27,53	27,76	21,21	19,81	MPa
Média percentual		0	+ 0,84	- 22,95	- 28,04	%

**APÊNDICE B - Resultados do ensaio de resistência à tração por
compressão diametral**

Corpo de Prova	Idade	TR 0,0%	TR 0,5%	TR 1,0%	TR 1,5%	Unid
A	7	2,69	2,52	1,89	1,84	MPa
B	7	2,42	2,26	1,75	1,63	MPa
C	7	2,13	1,95	1,60	1,38	MPa
Média		2,41	2,24	1,75	1,62	MPa
Média percentual		0	- 7,05	- 27,39	- 32,78	%

Corpo de Prova	Idade	TR 0,0%	TR 0,5%	TR 1,0%	TR 1,5%	Unid
A	21	2,71	2,71	2,09	1,88	MPa
B	21	2,65	2,25	2,01	1,64	MPa
C	21	2,12	2,24	1,83	1,40	MPa
Média		2,49	2,40	1,98	1,64	MPa
Média percentual		0	- 3,61	- 20,48	- 34,14	%

Corpo de Prova	Idade	TR 0,0%	TR 0,5%	TR 1,0%	TR 1,5%	Unid
A	28	2,78	2,74	2,18	1,97	MPa
B	28	2,74	2,65	2,16	1,70	MPa
C	28	2,64	2,49	2,13	1,69	MPa
Média		2,72	2,63	2,16	1,79	MPa
Média percentual		0	- 3,31	- 20,59	- 34,19	%

APÊNDICE C - Resultados do ensaio de flexão a 4 pontos

Corpo de Prova	Idade	TR 0,0%	TR 0,5%	TR 1,0%	TR 1,5%	Unid
A	28	3,35	3,29	3,35	3,11	MPa
B	28	3,20	3,13	3,03	2,65	MPa
C	28	3,18	3,09	2,88	2,31	MPa
Média		3,24	3,17	3,09	2,69	MPa
Média percentual		0	- 2,16	- 4,63	- 16,98	%

APÊNDICE D - Resultados do ensaio de desgaste abrasivo

Corpo Prova	Idade	Massa in. (g)	Massa fin. (g)	Perda mas. (g)	TR 0,0%
A	28	3371,40	3256,00	115,40	3,42%
B	28	3344,00	3213,80	130,20	3,89%
C	28	3162,90	3048,50	114,40	3,62%
Média		9878,30	9518,30	360,00	3,64%

Corpo Prova	Idade	Massa in. (g)	Massa fin. (g)	Perda mas. (g)	TR 0,5%
A	28	3381,10	3260,40	120,70	3,57%
B	28	3255,70	3139,90	115,80	3,56%
C	28	3135,00	3046,20	88,80	2,83%
Média		9771,80	9446,50	325,30	3,33%

Corpo Prova	Idade	Massa in. (g)	Massa fin. (g)	Perda mas. (g)	TR 1,0%
A	28	3371,20	3263,50	107,70	3,19%
B	28	3326,90	3173,80	153,10	4,60 %
C	28	3280,50	3129,70	150,80	4,60 %
Média		9978,60	9567,00	411,60	4,12%

Corpo Prova	Idade	Massa in. (g)	Massa fin. (g)	Perda mas. (g)	TR 1,5%
A	28	3342,20	3226,90	115,30	3,45%
B	28	3249,70	3141,40	108,30	3,33%
C	28	3147,60	3046,10	101,50	3,22%
Média		9739,50	9414,40	325,10	3,34%